



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Definició de criteris d'intensitat per esllavissaments del terreny

Treball realitzat per:

Marina Magaña Montasell

Dirigit per:

Jordi Corominas Dulcet

Grau en:

Enginyeria Geològica

Barcelona, Juny 2017

Departament d'Enginyeria del Terreny,
Cartografia i Geofísica.

TREBALL FINAL DE GRAU

“There are in nature neither rewards
nor punishments – there are consequences”

Robert G. Ingersoll

RESUM

El risc és la possibilitat de dany a la qual estan exposats la salut dels éssers vius, els béns o el propi medi ambient i, sovint, es mesura com el producte de la probabilitat i les conseqüències. En el present estudi es té en compte només el risc d'esllavissaments del terreny, exactament d'esllavissades, de desprendiments rocosos i de corrents d'arrossegalls. Aquestes amenaces geològiques suposen un risc generalitzat arreu del món a éssers humans i provoquen danys importants a estructures cada any. D'aquí esdevé la gran importància de la realització d'anàlisis quantitatives del risc i altres estudis per ajudar a tècnics, enginyers, administracions i altres parts interessades a gestionar el terreny i el risc, i a dissenyar mesures de protecció contra aquests fenòmens.

No obstant, de tots els components que generen el risc, el que caracteritza el potencial destructiu dels esllavissaments del terreny és la intensitat. Aquesta afirmació, però, no sempre s'ha exposat així ja que aquesta definició del concepte d'intensitat és molt recent. Antigament, els investigadors assignaven la capacitat destructiva dels fenòmens a la magnitud. Possiblement la raó fos per errors de confusió entre els conceptes o per la manca de dades d'inventari o de tecnologia que permetés la modelització d'aquests processos. Conseqüentment, la informació que hi ha al respecte fins al dia d'avui és escassa en comparació amb altres amenaces naturals com els terratrèmols o les allaus i encara queda molt per investigar.

Així doncs, no existeixen estàndards per definir la intensitat d'aquests tipus d'esllavissaments del terreny. Aquest fet revela un buit en aquest camp ja que les tasques d'avaluació, quantificació i gestió del risc serien més senzilles, ràpides i eficients si es disposés d'uns estàndards establerts per a qualsevol tipus de situació que es donés en qualsevol part del món tal i com passa, per exemple, amb les escales de Richter i de Mercalli en el camp dels terratrèmols.

L'objectiu principal del present treball és fer una primera proposta d'escala d'intensitat per tal d'obrir camí a la investigació cap a una escala d'intensitat el més completa possible de manera que es pugui establir, en un futur, una escala universal per als esllavissaments del terreny.

Per obtenir-la, però, primerament cal entendre com es propaguen i com interactuen aquests tres tipus d'esllavissaments amb els elements exposats per poder determinar quins són els descriptors d'intensitat que millor determinen el caràcter destructiu de cadascun d'ells. A continuació s'ha d'establir una escala de danys amb uns rangs de vulnerabilitat associats ja que són els diferents graus de dany els que fan de connectors de les equivalències d'intensitat entre esllavissades, desprendiments rocosos i corrents d'arrossegalls. Seguidament, es determinen els valors llindar d'intensitat per a cadascun dels graus de dany i s'acoblen en una sola taula per aconseguir així una escala global per als tres fenòmens. Finalment, es comprova l'aplicabilitat a l'anàlisi quantitativa del risc de tots els factors proposats. Aquesta validació es fa mitjançant la realització d'anàlisis quantitatives del risc en dos casos reals.

Per tant, tot i que hi ha una petita part experimental, bona part d'aquest treball consisteix en una revisió bibliogràfica d'estudis publicats en revistes internacionals. D'aquí es desprèn un segon objectiu, el qual consisteix en fer una recopilació de la informació obtinguda fins a l'actualitat, a part de detectar mancances i assenyalar així cap on s'haurien d'enfocar les futures investigacions.

Paraules clau: anàlisi quantitativa del risc, corrent d'arrossegalls, descriptors, desprendiment rocós, esllavissada, intensitat, risc, vulnerabilitat.

ABSTRACT

Risk is the possibility of damage to the health of human beings, goods or environment, and it is often measured as the product of the probability and the consequences. In the present study it takes into account the risk of soil movements, particularly, landslides, rock falls, and debris flows. These geological hazards suppose a widespread risk to human beings and cause important damages to structures every year around the world. This is the reason of the importance of the realisation of quantitative risk analyses and other studies to help technicians, engineers, administrations and stakeholders to do an adequate land planning, to manage the risk and to design properly the protection measures against these processes.

However, from all the parameters that compose the risk, only the intensity is the one that characterizes the destructiveness potential of landslides. Nevertheless, this statement has not always been as clear as nowadays because this definition of the intensity's concept is very recent. Formerly, researchers tended to assign the destructiveness character of landslides to the magnitude. Possibly, the reason was due to confusion errors between both concepts or due to the lack of inventory data or technology which would allowed the modelling of these phenomena. Consequently, there is less information about intensity of landslides in comparison with information from the intensity of other natural hazards such as earthquakes or snow avalanches, so there are still lots of things to be investigated.

Thus, there are no standards to define the intensity of these phenomena. This reveals a gap in this field because the assessment, the quantification and the management of risk would be more simple, fast and efficient if there was standards set for any situation that would occurred in any place of the world as happens, for example, with the Richter scale and Mercalli scale in the area of earthquakes.

The main objective of this study is to propose an initial intensity scale in order to start the investigation way to the most complete intensity scale in order to find, finally, the universal one to be established for landslides.

The first step to do in order to obtain the aimed intensity scale is to understand how landslides propagate downhill and how they interact with the exposed elements at risk. This will lead to the definition of the descriptors that best determine the destructive character of each type of landslide. The next step is to establish a scale of damage with their associated vulnerability ranges because this different levels of damage will be the connectors between the equivalences of the intensity values between landslides, rock falls and debris flows. Then, the limit values of intensity for each type of phenomena will be defined and all them will be assembled in one intensity scale in order to find a global scale for the three processes. Finally, the applicability of the proposed data will be checked using them in real case studies of quantitative risk assessment.

Therefore, although there is a small experimental part, the biggest part of this study consists in a literature review of studies published in international journals. There is also a second objective, which consists in making a compilation of information obtained and published until now, apart from highlight the found gaps in order to see in what should the future investigations be focused on.

Keywords: debris flow, descriptors, intensity, landslide, quantitative risk assessment, risk, rockfall, vulnerability.

RESUMEN

El riesgo es la probabilidad a la cual están expuestos la salud de los seres vivos, los bienes o el propio medio ambiente y, a menudo, es medido como el producto de la probabilidad y las consecuencias. En el presente estudio sólo se tienen en consideración los movimientos de ladera, concretamente de deslizamientos, desprendimientos rocosos y flujos de derrubios. Estas amenazas geológicas suponen un riesgo generalizado en todo el mundo a seres humanos y provocan daños importantes en estructuras cada año. De aquí acontece la gran importancia de la realización de análisis cuantitativos del riesgo y otros estudios para ayudar a técnicos, ingenieros, administraciones y otras partes interesadas a gestionar el terreno y el riesgo, y a diseñar medidas de protección contra estos fenómenos.

No obstante, de todos los componentes que generan el riesgo, el que caracteriza el potencial destructivo de los deslizamientos del terreno es la intensidad. Sin embargo, esta afirmación no siempre se ha expuesto así ya que esta definición del concepto de intensidad es muy reciente. Antiguamente, los investigadores asignaban la capacidad destructiva de los fenómenos a la magnitud. Posiblemente la razón se debiera a errores de confusión entre los dos conceptos o por la escasez de datos de inventario o de tecnología que permitiera la modelización de estos procesos. Consecuentemente, la información que hay al respecto hasta el día de hoy es escasa en comparación con otras amenazas naturales como los terremotos o las aludes, y aún queda mucho por investigar.

Así pues, no existen estándares para definir la intensidad de estos tipos de deslizamientos del terreno. Este hecho revela un vacío en este campo debido a que las tareas de evaluación, cuantificación y gestión del riesgo serían más sencillas, rápidas y eficientes si se dispusiera de unos estándares establecidos para cualquier tipo de situación que se diera en cualquier lugar del mundo tal y como pasa, por ejemplo, con las escalas de Richter i de Mercalli en el campo de los terremotos.

El objetivo principal del presente estudio es hacer una propuesta inicial de escala de intensidad por tal de abrir camino a la investigación hacia una escala de intensidad lo más completa posible de forma que se pueda establecer, en un futuro, una escala universal para los deslizamientos del terreno.

No obstante, para obtenerla, primeramente es necesario entender cómo se propagan y cómo interactúan estos tres tipos de deslizamientos con los elementos expuestos para poder determinar cuáles son los descriptores de intensidad que mejor describen el carácter destructivo de cada uno de ellos. A continuación, se debe establecer una escala de daños con unos rangos de vulnerabilidad asociados ya que son los diferentes grados de daño los que hacen de conectores de las equivalencias de intensidad entre deslizamientos, desprendimientos rocosos y corrientes de derrubios. Seguidamente, se determinan los valores umbrales de intensidad para cada uno de los grados de daño y se ensamblan en una sola tabla para conseguir, así, una escala global para los tres fenómenos. Finalmente, se comprueba la aplicabilidad al análisis cuantitativo del riesgo de todos los factores propuestos. Esta validación se hace mediante la realización de análisis cuantitativos del riesgo en dos casos reales.

Por lo tanto, a pesar de haber una pequeña parte experimental, buena parte de este trabajo consiste en una revisión bibliográfica de estudios publicados en revistas internacionales. De aquí se desprende un segundo objetivo, el cual consiste en hacer una recopilación de la información obtenida hasta la actualidad, aparte de detectar carencias y señalar, así, hacia donde se deberían enfocar las futuras investigaciones.

Palabras clave: análisis cuantitativa del riesgo, corriente de derrubios, descriptores, deslizamiento de ladera, desprendimiento rocoso, intensidad, riesgo, vulnerabilidad.

ÍNDEX DEL TREBALL

1. INTRODUCCIÓ	10
2. SÍNTESI DE L'ESTAT DE L'ART	13
2.1. Introducció al risc	13
2.1.1. Classificació d'amenaques	13
2.2. Amenaces Naturals: Les esllavissades	14
2.2.1. Concepte d'esllavissada	14
2.2.2. Mecànica de les esllavissades	16
2.2.3. Mecanismes de ruptura i caracterització del moviment	18
2.2.4. Mecanismes de propagació	23
2.2.5. Mètodes per al càlcul del moviment o de la propagació	25
2.2.6. Factors desencadenants	26
2.2.7. Magnitud i intensitat	27
2.2.8. Perillositat i susceptibilitat	30
2.3. Risc d'esllavissada	30
2.3.1. Equació del risc d'esllavissada	30
2.3.2. Components de la fórmula del risc d'esllavissada	31
2.3.3. Aplicació de la fórmula del risc: Mapes de zonació	49
3. PROPOSTA DE DESCRIPTORS D'INTENSITAT	56
3.1. Objectiu	56
3.2. Descriptors d'intensitat	56
3.3. Interacció fenòmens - elements exposats	57
3.3.1. Esllavissades	58
3.3.2. Despreniments rocosos	61
3.3.3. Corrents d'arrossegalls	62
3.4. Revisió bibliogràfica de descriptors d'intensitat d'esllavissades	64
3.5. Discussió dels resultats i proposta de descriptors d'intensitat	64
3.6. Comparativa amb altres amenaces naturals	66
3.6.1. Terratrèmols	66
3.6.2. Tsunamis	67
3.6.3. Allaus	67
3.6.4. Huracans	68
3.6.5. Inundacions	68
4. PROPOSTA D'ESCALA D'INTENSITAT	69
4.1. Introducció	69
4.2. Definició d'escenaris i descriptors	70
4.2.1. Escenari 1 (esllavissades)	70
4.2.2. Escenari 2 (despreniments rocosos)	71
4.2.3. Escenari 3 (corrents d'arrossegalls)	73
4.3. Proposta d'escala de danys i rangs de vulnerabilitat dels elements exposats	74

4.3.1. Revisió bibliogràfica	74
4.3.2. Proposta per a esllavissades	76
4.3.3. Proposta per a desprendiments rocosos	79
4.3.4. Proposta per a corrents d'arrossegalls	81
4.3.5. Discussió	83
4.4. Proposta d'escalas d'intensitat	83
4.4.1. Revisió bibliogràfica	83
4.4.2. Proposta per a esllavissades	84
4.4.3. Proposta per a desprendiments rocosos	85
4.4.4. Proposta per a corrents d'arrossegalls	87
4.4.5. Proposta d'escala d'intensitat global.....	88
4.4.6. Discussió	89
4.5. Comparativa amb altres amenaces naturals	90
4.5.1. Terratrèmols	90
4.5.2. Tsunamis	90
4.5.3. Allaus	91
4.5.4. Discussió	91
5. APLICACIÓ A CASOS REALS	92
5.1. Introducció.....	92
5.2. Exemple 1: Esllavissades de Lungro, Itàlia	92
5.2.1. Presentació.....	92
5.2.2. Zona d'anàlisi	93
5.2.3. Metodologia.....	95
5.2.4. Limitacions.....	96
5.2.5. Anàlisi quantitativa del risc i resultats.....	97
5.2.6. Discussió	99
5.3. Exemple 2: Corrent d'arrossegalls de Tresenda, Itàlia	99
5.3.1. Presentació.....	99
5.3.2. Zona d'anàlisi	100
5.3.3. Metodologia.....	104
5.3.4. Limitacions.....	104
5.3.5. Anàlisi quantitativa del risc i resultats.....	105
5.3.6. Discussió	107
6. CONCLUSIONS	108
7. BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA.....	111
7.1. Bibliografia	111
7.2. Webgrafia	119

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1.	16
Figura 2.	18
Figura 3.	20
Figura 4.	21
Figura 5.	33
Figura 6.	36
Figura 7.	38
Figura 8.	39
Figura 9.	40
Figura 10.	41
Figura 11.	42
Figura 12.	44
Figura 13.	45
Figura 14.	47
Figura 15.	52
Figura 16.	52
Figura 17.	53
Figura 18.	54
Figura 19.	54
Figura 20.	55
Figura 21.	59
Figura 22.	59
Figura 23.	62
Figura 24.	75
Figura 25.	76
Figura 26.	93
Figura 27.	95
Figura 28.	100
Figura 29.	101
Figura 30.	102
Figura 31.	103

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1.....	65
Taula 2.....	69
Taula 3.....	77
Taula 4.....	77
Taula 5.....	78
Taula 6.....	78
Taula 7.....	78
Taula 8.....	79
Taula 9.....	79
Taula 10.....	80
Taula 11.....	80
Taula 12.....	80
Taula 13.....	81
Taula 14.....	81
Taula 15.....	82
Taula 16.....	82
Taula 17.....	82
Taula 18.....	84
Taula 19.....	86
Taula 20.....	87
Taula 21.....	89
Taula 22.....	94
Taula 23.....	94
Taula 24.....	97
Taula 25.....	98
Taula 26.....	98
Taula 27.....	102
Taula 28.....	105
Taula 29.....	105
Taula 30.....	106
Taula 31.....	106
Taula 32.....	106
Taula 33.....	107

1. INTRODUCCIÓ

El risc és la possibilitat de dany a la qual està exposat un element donat. Aquest element pot ser la salut, els béns o el medi ambient. Sovint, es mesura com el producte de la probabilitat i les conseqüències.

En aquest treball es considera només el risc d'esllavissaments del terreny, concretament d'esllavissades, de desprendiments rocosos i de corrents d'arrossegalls. Aquests són fenòmens generalitzats que amenacen cada any als éssers humans i causen danys significatius en les estructures. D'aquí ve la importància de fer anàlisis quantitatives del risc i altres estudis relacionats com avaluacions de vulnerabilitat i susceptibilitat o modelitzacions de la propagació d'esdeveniments potencials.

De fet, com a resultat de l'avaluació del risc es creen mapes de zonació en els quals es reflecteix sobre els mapes les zones de més i menys risc, els quals utilitzen tècnics, enginyers, administracions i parts interessades per fer una bona ordenació territorial i dissenyar les mesures de protecció contra aquestes amenaces geològiques.

Cal destacar, però, que de tots els factors que componen el risc, el que defineix la capacitat destructiva d'aquests processos geològics és la intensitat. No obstant, aquesta afirmació no s'ha pogut dir d'aquesta manera al llarg de la història ja que aquesta definició del concepte d'intensitat és molt recent.

Històricament el concepte d'intensitat s'ha vist en un segon pla o, fins i tot, completament eclipsat pel de magnitud. Això es pot deure a un error de confusió entre els dos conceptes i/o la manca de dades d'inventari o de tecnologia que permetés la modelització d'aquests fenòmens. Conseqüentment, l'estudi de la capacitat destructiva de les esllavissades va pel darrere dels estudis fets per altres amenaces naturals com són els terratrèmols, els tsunamis o les allaus, entre d'altres.

Recentment, però, s'ha pres consciència del fet que una magnitud gran no té perquè implicar uns danys elevats. Pot donar-se la situació contrària on un esdeveniment de magnitud petita pot provocar danys severos als objectes exposats. Un bon exemple d'això poden ser les dues situacions següents: pot succeir que tot un vessant s'estigui desplaçant a poca velocitat (desenes de mil·límetres a l'any) de manera que no comporti danys important als elements exposats, i també es pot donar la situació de que un vessant s'esllavissi ràpidament (varis metres per segon) provocant pèrdues humanes i col·lapses parcials i totals en estructures.

Conseqüentment, no existeixen estàndards per definir la intensitat d'aquests tipus d'esllavissaments del terreny. Això és un punt dèbil important dins d'aquest camp perquè les tasques d'avaluació, quantificació i gestió del risc serien més senzilles, ràpides i, per tant, més eficients. Tal com s'apuntava anteriorment, no passa el mateix, per exemple, en l'àmbit dels terratrèmols on s'ha aconseguit estandarditzar una escala de magnitud, coneguda com a escala de Richter, i una escala d'intensitat, coneguda com a escala de Mercalli.

No obstant, la creació d'una escala d'intensitat universal per als esllavissaments del terreny presenta una complexitat afegida respecte les altres amenaces naturals, ja que aquests es divideixen en diferents tipus de mecanismes d'inestabilitat amb diferents característiques intrínseques, diferents mecanismes de propagació i diferent interacció amb els elements exposats.

Per tant, entre la recent admissió del concepte d'intensitat per caracteritzar el potencial destructiu dels esllavissaments del terreny, i la dificultat que comporta trobar unes equivalències entre els diferents tipus de fenòmens, és comprensible que encara no s'hagi arribat a fer aquest pas.

En el present treball, doncs, es presenta l'objectiu de fer una primera proposta d'escala d'intensitat la qual apliqui tant a esllavissades, desprendiments rocosos i corrents d'arrossegalls, a més de considerar el dany a diferents tipus d'estructures, infraestructures i persones. Un tret interessant d'aquesta escala, a part de donar valors llindar per a diferents graus d'intensitat, és que estableix unes equivalències entre els descriptors dels tres fenòmens aquí estudiats, cosa que rarament s'ha fet en els recents anys d'estudi dins d'aquest camp.

Amb aquesta proposta es pretén avançar en la investigació de la intensitat i, a més, obrir camí cap a la creació d'una escala el més completa possible, tant pel que fa a descriptors com a elements exposats, per arribar algun dia a obtenir una escala que pugui ser mundialment aplicada sigui quina sigui la situació donada.

La metodologia a seguir serà fer una revisió bibliogràfica d'estudis publicats en revistes internacionals per tal de veure quina és la informació que s'ha presentat fins a l'actualitat, així com fer una recopilació de les diferents propostes d'escalas d'intensitat publicades al llarg dels anys. Llavors, a partir d'aquesta informació i de l'estudi de la propagació i la interacció fenomen-objecte exposat i danys provocats es farà la pròpia proposta d'escala d'intensitat.

Els passos a fer, doncs, seran els següents: primer, definir uns escenaris per acotar unes condicions i unes situacions per als quals l'escala proposada serà aplicable. A continuació es farà una proposta d'escala de danys, la qual portarà associada uns rangs de vulnerabilitat amb els que es podran fer les anàlisis quantitatives del risc. És important establir aquesta escala de danys perquè, justament, seran aquests nivells de dany els que permetran establir les equivalències entre els diferents tipus de fenòmens. Fet això, el següent pas serà trobar els valors dels descriptors que provocarien els danys descrits en el pas anterior i, finalment, es farà l'assemblatge de tots els valors proposats per obtenir així una escala global per als tres tipus d'esllavissaments del terreny.

No obstant, per arribar a la creació d'aquesta proposta d'escala, cal primerament conèixer bé quins són els mecanismes de propagació, així com la interacció dels fenòmens amb els elements exposats, per poder determinar els descriptors més adients per mesurar la intensitat de cadascun dels tres tipus d'esllavissaments. Per tant, el primer pas a realitzar per arribar a l'objectiu de l'escala d'intensitat és fer una proposta de descriptors d'intensitat.

Per fer-ho, es farà una revisió bibliogràfica de diferents publicacions científiques presentades al llarg dels anys per veure quins han sigut els descriptors que s'han escollit per treballar la intensitat. A part, serveix per veure si els diferents autors coincideixen a l'hora de fer les seves eleccions, cosa que indicaria que existeix un conjunt finit de descriptors que han funcionat i que han sigut aplicables a diferents estudis.

Tanmateix, així com hi ha un pas previ a la proposta de l'escala d'intensitat, també hi ha un pas posterior, el qual té com a objectiu la comprovació de l'aplicabilitat de les propostes presentades a l'anàlisi quantitativa del risc. En aquest punt, s'agafaran referències d'esdeveniments reals i es farà una anàlisi quantitativa del risc de cadascuna d'elles per verificar si la proposta de descriptors, escala de danys, rangs de vulnerabilitat i escala d'intensitat és vàlida i aplicable a situacions reals.

Per últim, dir que aquest és un treball bàsicament bibliogràfic de manera que intrínsecament també té l'objectiu d'investigar quins són els antecedents d'aquest àmbit i quins avenços s'han fet ens els darrers anys per, finalment, fer una recopilació de tota aquesta informació i utilitzar-la per obtenir una primera proposta escala d'intensitat. Aprofitant això, es pot veure en quin punt es troba aquest camp actualment, de manera que es poden detectar i mostrar quins són els punts dèbils per tal d'assenyalar cap a on s'haurien d'enfocar les futures investigacions.

2. SÍNTESI DE L'ESTAT DE L'ART

2.1. Introducció al risc

El risc es pot definir com la probabilitat de que es produeixi un dany o de que una amenaça s'acabi convertint en un desastre. No obstant, moltes vegades es confonen els termes risc i perill ja que aquests dos conceptes en el llenguatge corrent es consideren sinònims i, de vegades, s'acaben utilitzant de forma inconsistent. Un exemple d'això pot ser la definició que fa l'Institut d'Estudis Catalans, el qual defineix el risc com:

“Contingència a la qual està exposat algú o alguna cosa, perill incert.”

Precisament això s'explica molt bé en el cercador digital *Definición.de* on fan el següent aclariment:

“La noció del risc es sol utilitzar com a sinònim de perill. El risc, no obstant, està vinculat a la vulnerabilitat, mentre que el perill apareix associat a la factibilitat del perjudici o dany. És possible distingir, doncs, entre risc (la possibilitat de dany) i perill (la probabilitat d'accident o patologia). En altres paraules, el perill és una causa del risc.”

Aquesta amenaça a la que fa referència la definició del risc es pot tractar d'un dels deu tipus d'amenaques que s'exposen en el punt 2.1.1.

Una definició més científica és la següent (Fell et al., 2008):

“Mesura de la probabilitat i gravetat d'un efecte advers per a la salut, els béns o el medi ambient. El risc sovint s'estima com el producte de la probabilitat i les conseqüències.”

2.1.1. Classificació d'amenaques

- Estructurals: fuites de productes tòxics o perillosos, mala il·luminació, caiguda d'objectes, qualsevol situació on les persones, els productes o la tecnologia poden resultar damnificats, etc.
- Financeres: fracàs empresarial, fluctuacions del mercat de valors, canvis en les taxes d'interès, no disponibilitat dels fons, etc.
- De gestió: fallades en la rendició de comptes, en sistemes interns o en sistemes de control, frau, etc.
- Humanes: malalties, lesions, mort, etc.
- Naturals: canvis en la climatologia, malalties, desastres naturals, etc.
- Operacionals: interrupció dels subministraments i les operacions, pèrdua d'accés als béns essencials, etc.
- Productives: anar per sobre del pressupost, perdre massa temps en tasques clau, experimentar problemes amb la qualitat del producte o el servei, etc.
- Polítiques: opinió pública, influència estrangera, canvis en els impostos, etc.
- Reputacionals: pèrdua de confiança de clients, proveïdors o empleats, danys a la reputació del mercat, etc.
- Tècniques: amenaces en la tecnologia, fallida tècnica, corrupció de la xarxa, etc.

En aquest cas, però, l'estudi es centra només en el risc produït per amenaces naturals, donades per desastres naturals. Aquests poden ser bastant variats, com són les inundacions, els terratrèmols, els tsunamis, les allaus o, les esllavissades, les quals són les protagonistes d'aquest estudi.

2.2. Amenaces Naturals: Les esllavissades

2.2.1. Concepte d'esllavissada

El terme *esllavissada* moltes vegades s'utilitza de manera generalitzada per definir tots els processos que donen lloc al moviment cap avall i cap enfora del vessant, de sòls, roques, materials artificials o una combinació de tots aquests. Els tipus de moviments més significatius són els següents (Cruden & Varnes, 1996; Hungr et al., 2014):

- **Esllavissades:** són moviments que es produeixen en vessants on una porció de massa del terreny llisca sobre una superfície de cisalla més o menys ben definida. Aquests poden ser des d'extremadament lents a ràpids.

Es cataloguen com a esllavissades lentes les que mostren els següents rangs de desplaçaments (Cruden & Varnes, 1996; Hungr et al., 2014):

1. Extremadament lentes: es produeix un desplaçament inferior als 16 mm/any.
2. Molt lentes: es desplacen a una velocitat d'entre 16 mm/any i 1.6 m/any.
3. Lentes: la taxa de moviment va des dels 1.6 m/any fins als 160 m/any.

I, segons la naturalesa del pla de lliscament es poden donar dos tipus d'esllavissades:

- **Rotacionals:** La superfície de lliscament es produeix de forma cònca o circular dins del material. La velocitat d'aquests moviments tant pot ser lenta (menys d'un centímetre a l'any) com moderada/ràpida (alguns metres al dia), tot i que normalment es veu accelerada en episodis de pluja excessiva (Figura I. I de l'ANNEX I).
- **Translacional:** En aquest cas es tracta d'un volum de terreny que llisca pendent avall al llarg d'una superfície més o menys planar o lleugerament ondulada. Aquestes esllavissades estan controlades per les possibles fractures de la roca i la resistència del material. Tal i com passa amb les rotacionals, la velocitat tant pot ser lenta com ràpida en funció del tipus de material, del pendent del vessant o la rugositat de la superfície de ruptura, entre d'altres (Figura I. II de l'ANNEX I).
- **Despreniments:** aquests moviments es produeixen quan una massa de sòl o roca es separa/desenganxa d'un vessant dret, pràcticament vertical, i cau lliurement a través de l'aire, saltant o rodolant, depenent del grau d'inclinació del pendent. A mesura que es va desplaçant, aquesta massa es va fragmentant en parts més petites, les quals segueixen una trajectòria semblant. El volum d'aquesta massa pot ser molt variable ja que pot anar des de blocs de pocs centímetres cúbics fins a masses rocoses de centenars de milers de metres cúbics. No obstant, la freqüència és inversament proporcional al volum de massa despresa, és a dir, la caiguda de blocs petits és molt més freqüent que el desprendiment de blocs o masses rocoses grans. La velocitat sempre és molt elevada. (Figura I. III de l'ANNEX I).
- **Bolcaments:** en aquest altre cas, es tracta de columnes de roca o terra, formades a partir de fractures més o menys verticals, que presenten un moviment de rotació en direcció al vessant al voltant d'un eix situat per sota del seu centre de gravetat. Aquest moviment està format per una lenta inclinació de roques dures (molt resistents però fràgils) situades al

damunt de roques toves (poc resistents però dúctils), i el bolcament ràpid de les roques dures inclinades (Figura I. IV de ANNEX I).

- Extensions laterals: són desplaçaments laterals controlats per fractures. Solen donar-se en situacions on hi ha blocs de roca o masses de terra cohesiva sobre material tou i deformable, de manera que es produeix una fragmentació de la capa superior com a conseqüència d'aquesta diferencia de resistències entre materials. Són moviments generalment lents (entre varis mil·límetres a l'any) que poden arribar, però, als pocs metres al dia, poc freqüents i solen abastir grans extensions, arribant a afectar vessants de centenars de quilometres (Figura I. V de ANNEX I).
- Fluxos: són moviments generalment ràpids que es produeixen en roca, sòl o material artificial, com runes. En els dos últims casos es solen produir quan el terreny es satura d'aigua, sobretot en períodes de pluja intensa. Els diferents subtipus que existeixen es diferencien segons el material transportat, el contingut d'aigua i la velocitat de descàrrega, la qual pot ser lenta (com passa en els casos de reptació) o altament ràpida, quasi bé de manera sobtada (com quan es formen fluxos de blocs rocosos). Els fluxos més comuns doncs són els següents:
 - Corrents d'arrossegalls: són fluxos turbulents molt ràpids (valors de quilometres/hora), normalment relacionats amb episodis de tempestes, els quals transporten tot tipus de material: tant fragments rocosos com blocs de roca, còdols i graves, fins a sorres, llims i argiles, havent majoritàriament més quantitat de fragments grollers que de partícules fines, els quals formen el 50% o més de la composició total, a part d'aigua i aire. Aquests moviments s'inicien en parts altes dels vessants i es canalitzen barrejant-se amb l'aigua torrencial convertint-se així amb un flux turbulent. Per tant, aquest flux es troba canalitzat en el torrent, pel qual baixa molt ràpidament i alhora, al ser turbulent, va erosionant el llit de manera que el volum de material va augmentant fins arribar a un nivell en que es desborda, arrasant amb tot el que troba pel davant. Finalment el pendent del vessant disminueix, o el flux perd volum d'aigua, fins que s'acaba aturant. A diferència dels altres fenòmens, aquests ocorren periòdicament en trajectòries establertes (traçades pels canals de drenatge). A més, les característiques d'aquests canals són els que acaben determinant, en bona part, la magnitud dels corrents d'arrossegalls (Hungar et al., 2014) (Figura I. VI de ANNEX I).
 - Colades de terra o fang: són moviments que poden ser des de moderadament ràpids fins a extremadament ràpids (poden anar des de varis metres/dia fins a varis quilometres/hora) i la seva extensió pot ser molt variable (des de pocs metres quadrats fins a varis quilometres quadrats). Es formen de la mateixa manera que els corrents d'arrossegalls però la gran diferencia, en aquest cas, és que el material transportat és un sòl saturat format per partícules fines (argiles i llims) amb una alta plasticitat (índex de plasticitat > 5%). El contingut d'aigua del material transportat és significativament major en relació amb el material d'origen. Es produeix un fort arrossegament de material al llarg de la trajectòria del flux (Hungar et al., 2014) (Figura I. VII de ANNEX I).
 - Reptacions: són moviments molt lents (des de pocs mil·límetres/any fins a pocs decímetres/any) causats per la inestabilitat de les capes més superficials del terreny i la gravetat. Es solen identificar al veure troncs d'arbres corbats, esquerdes en el terreny i en les carreteres, senyals de trànsit o torres elèctriques inclinades, etc. Aquests desplaçaments tenen poca capacitat destructiva tot i que poden arribar a provocar danys considerables en les estructures, generalment reparables (Figura I. VIII de ANNEX I).

Per últim, cal comentar que en moltes ocasions tenen lloc més d'un tipus de moviment a la vegada, anomenant-se llavors moviments compostos. Un exemple d'això seria un moviment compost esllavissada-flux en el qual es produeix primerament un desprendiment rocós que acaba derivant en un corrents d'arrossegalls.

No obstant això, en el present estudi es treballarà només amb els següents tres tipus d'esllavissades:

- *Esllavissades.*
- *Desprendiments rocosos.*
- *Corrents d'arrossegalls.*

2.2.2. Mecànica de les esllavissades

El moviment de les esllavissades depèn de la geologia, geomorfologia, hidrologia, hidrogeologia i mecànica del sòl de l'àrea implicada. Aquests moviments es deuen a canvis de tensió, deformació i/o condicions de contorn al llarg del temps en la zona afectada, i es poden dividir en quatre fases, les quals s'han establert a partir de les diferents característiques mecàniques que intervenen en cada fase. Les quatre fases, són: pre-ruptura, ruptura, post-ruptura i reactivació (Figura 1.).

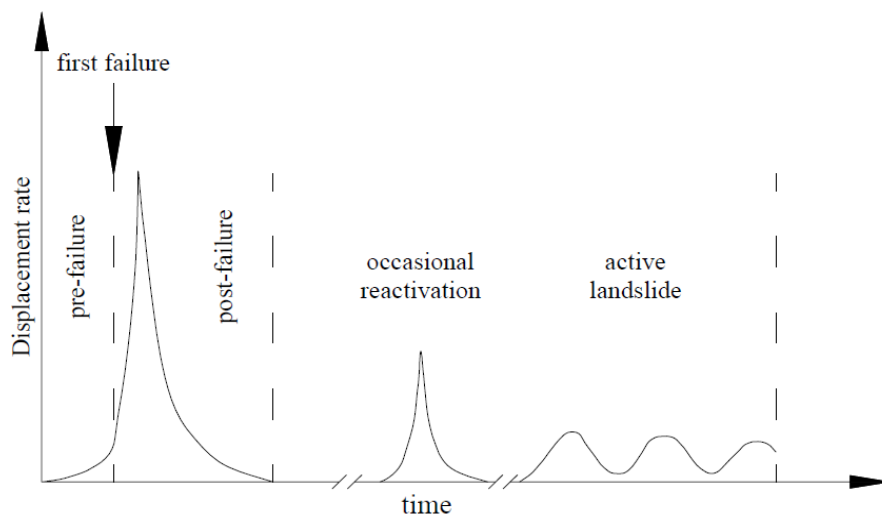


Figura 1. Gràfic on es representen les quatre fases al llarg de la vida d'una esllavissada en funció dels seus desplaçaments al llarg del temps. **Font:** (Leroueil et al., 1996).

A continuació, s'explica resumidament en què consisteix cada fase:

Fase 1: Pre-ruptura

És la etapa inicial, la qual pot tenir una durada molt variable en funció del tipus de sòl i del sistema de tensions a les quals està sotmès. En aquesta fase s'engloben totes les deformacions i moviments que es produeixen abans de l'esllavissada. Al començament, aquests moviments presenten desplaçaments molt curts controlats per petits canvis de tensions de caràcter elasto-visco-plàstic. Tanmateix, els desplaçaments augmenten quan més s'apropa el moment de la ruptura a causa de la formació i propagació gradual de la zona de cisalla, provocant canvis de tensions de caràcter visco-plàstic.

Fase 2: Ruptura

Aquesta és la fase en la que es desencadena l'esllavissada, la qual té una durada molt curta ja que la ruptura es succeeix en un moment més o menys sobtat. En aquest cas s'acaba de formar perfectament la zona de cisalla de manera que arriba al punt en que les forces desestabilitzadores són iguals que les forces de resistència. No obstant, la formació de la ruptura és més complexa, de manera que el seu desencadenament és fruit de la suma de diferents factors.

Fase 3: Post- ruptura

En aquest estadi s'inclou el moviment de massa que es produeix just després de donar-se la ruptura. Aquí, hi ha un desplaçament inicial d'una massa de sòl o roca que llisca sobre la superfície de cisalla, el qual va disminuint amb el temps. Això es deu a la gran energia potencial alliberada en el moment de la ruptura, la qual es va dissipant a mesura que es desenvolupa l'esllavissada degut a que es transforma en energia de fricció fins que arriba a un estat d'equilibri en el que s'atura. És per això que la seva durada pot ser molt variable, ja que, segons el tipus d'esllavissada que es doni, durarà més o menys.

En materials dúctils o elasto-plàstics tota l'energia potencial inicial s'acaba dissipant en energia de fricció, de deformació interna i desintegració, i cinètica. Això fa que siguin moviments amb desplaçaments petits (D'Elia et al., 1998).

No obstant, el grau de desplaçament també anirà en funció de la pressió de porus, ja que el grau de moviment serà proporcional al nivell de pressió de porus del material, si la pressió de porus varia estacionalment. És a dir, els moviments seran més petits quan la pressió de porus sigui més petita i, més grans, quan la pressió de porus sigui més elevada (D'Elia et al., 1998).

En canvi, en materials fràgils (Figura 2) hi ha una diferència important entre la resistència pic i la resistència residual. Això permet que l'energia cinètica pugui arribar a ser molt elevada, produint esllavissades amb un gran recorregut i, per tant, més abast. Aquest abast, a part, serà més elevat si el volum de la massa trencada és més important.

Així doncs, en materials perfectament plàstics, tota l'energia potencial s'acaba transformant en energia de dissipació. D'aquesta, manera l'energia cinètica acaba sent molt reduïda, i els moviments que s'acaben produint són petits.

Cal destacar que els moviments que es produeixen en la fase de propagació no se'ls hi poden aplicar els principis de la mecànica de sòls ni la de roques degut al canvi que succeeix en les característiques del terreny una vegada pateix la ruptura. Així doncs, és millor descriure'ls en termes de conceptes de mecànica de fluids integrats en un model visco-plàstic, com el que va desenvolupar (Hungr, 1995) per a fluxos ràpids i avingudes (Díaz, 1998).

Fase 4: Reactivació

En aquesta última fase s'engloben tots aquells moviments que es produeixen en una zona de cisalla ja preexistent i venen controlats pel caràcter friccional del material involucrat. Aquestes reactivacions succeeixen quan la tensió de cisalla induïda és superior a la residual. La taxa de desplaçament és molt variable degut a que depèn de varis factors com la geometria del vessant, les tensions que s'hi formen, la pressió de porus induïda per la força que fa la massa de sòl, la dissipació d'aquesta mateixa pressió de porus i les fluctuacions del nivell freàtic de la zona (Leroueil et al., 1996).

Pel que fa a l'abast de les esllavissades, aquest està determinat per la quantitat d'energia cinètica de l'esdeveniment, a part del volum del material desplaçat, de manera que quanta més energia cinètica es transforma de la potencial inicial més elevat és el recorregut de l'esllavissada. D'aquest fenomen s'han extret les observacions següents (Díaz, 1998):

- La relació entre el volum del material esllavissat i la distància recorreguda ve determinada pel nivell d'humitat o saturació dels materials.
- La distància recorreguda generalment augmenta amb el volum de la massa desplaçada.
- L'energia i la longitud recorreguda augmenta amb l'alçada de l'esllavissada.
- La relació $\log(\text{longitud}) - \log(\text{volum})$ és essencialment lineal i amb les limitades dades que existien es va proposar una pendent de 0.16 entre els dos valors.

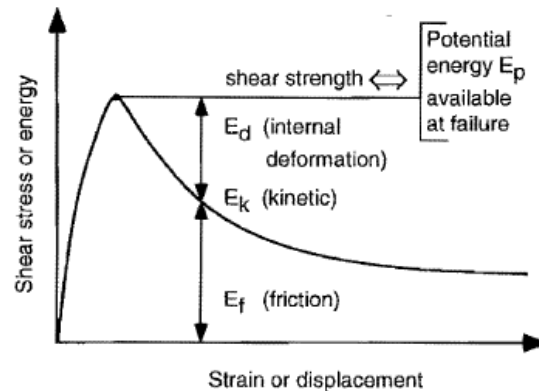


Figura 2. Gràfic de la redistribució de l'energia potencial (fase post-ruptura). **Font:** (D'Elia et al., 1998).

2.2.3. Mecanismes de ruptura i caracterització del moviment

2.2.3.1. Esllavissades

El sentit més restrictiu del terme esllavissada es correspon amb els moviments de massa de sòl o roca pendent avall, els quals tenen lloc en superfícies de ruptura o en zones relativament primes amb molta tensió de cisalla, és a dir, allà on hi ha una zona dèbil la qual separa el material esllavissat del material estable que s'hi troba a sota (Cruden & Varnes, 1996; Petrucci & Gullà, 2009).

Generalment, els primers signes que mostren la generació d'una esllavissada són l'aparició d'esquerdes en la superfície del terreny al llarg de la zona on es generarà la cicatriu de coronació i l'escarpament (Cruden & Varnes, 1996).

Com ja s'ha vist en el punt 2.1.1, les esllavissades poden ser rotacionals o translacionals. No obstant, a vegades es dona el cas en que l'esllavissada produïda és una combinació d'aquests dos tipus, la qual rep el nom d'esllavissada composta.

En les esllavissades rotacionals el material després es desplaça sobre una superfície de ruptura corba i còncava. En elles, la massa esllavissada experimenta un gir entorn a un eix situat per sobre del seu centre de gravetat. Conseqüentment, el material situat a la part del peu quasi bé es mou verticalment cap avall mentre que el de la part de l'encapçalament pateix una inclinació contra el vessant generant depressions en el terreny on s'hi acaba acumulant aigua. A part, el sistema de drenatge es pot veure interromput de manera que el material desplaçat es mantingui humit induint a que es donin reactivacions de la mateixa esllavissada fins que, progressivament, el moment del gir i del gradient del pendent disminueixin i s'estabilitzi. No obstant, les reactivacions també es poden donar a partir d'activitats antròpiques com excavacions en el peu de la massa desplaçada o a partir de canvis en les condicions piezomètriques de la zona afectada (Corominas, 2004; Cruden & Varnes, 1996).

Les esllavissades d'aquest tipus es solen donar en terrenys formats per sòls homogenis cohesius o massissos rocosos altament fracturats. En el cas d'haver materials argilosos i presència d'aigua es pot generar, des del peu del material situat sobre la superfície de ruptura, el fenomen que es coneix com a esllavissada o colada de sòls (Corominas, 2004).

No obstant, no és molt freqüent trobar sòls homogenis en terrenys naturals. Sovint a la natura els materials no són uniformes i, a més, els mecanismes de ruptura generalment segueixen heterogeneïtats i discontinuïtats. És per això que freqüentment les esllavissades rotacionals es donen en terrenys que han sigut reomplerts, els quals normalment sí són homogenis (Cruden & Varnes, 1996).

Pel que fa a la forma de la superfície de ruptura, si aquesta és circular o cicloïdal indicarà una cinemàtica que permetrà el moviment de la massa esllavissada per la superfície de ruptura generant poca deformació interna. Per altra banda, la superfície de ruptura serà més o menys cilíndrica si el terreny després s'estén una distància considerable al llarg del pendent perpendicularment a la direcció del lliscament. En aquests casos, l'escarpament generat a sota de la cicatriu de coronació, pot ser pràcticament vertical i manca d'un suport que el mantingui en aquesta situació al llarg del temps. De fet, pot succeir que els extrems acabin caient sobre la zona de descàrrega. A més, altres moviments poden provocar el retrocés de l'esllavissada en la part de la cicatriu de coronació (Cruden & Varnes, 1996).

En l'altre tipus d'esllavissades, les translacionals, el material esllavissat es desplaça sobre una superfície de ruptura planar o ondulada i, sovint, les ruptures són en forma de canal en secció transversal (Cruden & Varnes, 1996). Els components del material desplaçat es mouen a la mateixa velocitat i segueixen trajectòries paral·leles (Corominas, 2004). Es solen donar en materials heterogenis ja siguin sòls no cohesius, no consolidats o lloses rocoses amb superfícies de discontinuïtat ben definides, com falles, juntes, contactes entre sòl i roca, etc. (Highland & Bobrowsky, 2008; Vallejo, 2002).

Aquests moviments, a diferència dels rotacionals els quals tendeixen a retornar la massa desplaçada a l'equilibri, no ho fan. És per això que aquestes esllavissades poden continuar baixant pel vessant sense control si aquest és suficientment inclinat i continu.

A més, el material després es pot trencar si la velocitat o la presència d'aigua s'incrementa, de manera que la massa disgregada s'acaba transformant en un corrent d'arrossegalls, més que en una esllavissada (Cruden & Varnes, 1996; Mavrouli & Corominas, 2010b).

Les esllavissades translacionals generalment segueixen discontinuïtats del terreny com són, per exemple, falles, canvis de material, contactes entre roca i sòl residual o sòl transportat, etc. (Cruden & Varnes, 1996).

Quan la superfície de ruptura segueix una discontinuïtat paral·lela al pendent, el peu del material esllavissat pot generar una espècie de falca que llaura el material no desplaçat provocant un plegament més enllà del peu de la superfície de ruptura (Cruden & Varnes, 1996).

A part d'això, dins del tipus d'esllavissada translacional, es poden distingir diferents tipus de fenòmens. Quan es produeix un desplaçament de blocs de sòl o roca pràcticament sencers sobre superfícies úniques en massissos rocosos es defineix com a relliscada o relliscada planar. Si, en canvi, la superfície de ruptura està formada per dos plans que forcen a la massa rocosa continguda a desplaçar-se segons la línia d'intersecció és el que s'anomena com a esllavissada en falca. Per altra banda, quan la ruptura per cisalla es produeix en sòls no cohesius amb granulometria gran té lloc el que es coneix com a esllavissada de terres. I per últim, quan la massa despresa es trenca en moltes parts generant una acumulació caòtica de blocs en el peu del vessant es cataloga com a corriment (Corominas, 2004).

Considerant ara els materials de la superfície de ruptura, s'ha observat que en la majoria de casos està formada per sòls generalment argilosos i llimosos, seguit per materials rocosos poc resistents com són, per exemple, els esquistos. Llavors, estan els casos on la ruptura segueix la junta entre un material rocós sota d'un sòl i, per últim, els casos menys freqüents que són els que es donen en materials únicament formats per roca (Mansour et al., 2011).

2.2.3.2. Despreniments rocosos

Un desprendiment rocós succeeix quan una porció de sòl o roca d'un pendent pràcticament vertical es desprèn seguint una superfície sobre la qual hi ha molt poc, o inclús, cap desplaçament per cisalla, de manera que acaba separant-se de la resta de la formació del terreny, la qual es manté a la paret. Aquestes parets rocoses escarpades solen estar afectades per la meteorització, la qual genera esquerdes, fractures i discontinuïtats que afavoreixen la iniciació dels desprendiments (Corominas, 2004; Cruden & Varnes, 1996; Dorren, 2003; Novotný, 2013). Per tant, a part dels factors desencadenants, els factors físics i químics que donin lloc a la meteorització i el tipus de material del escarpament controlaran l'aparició de discontinuïtats en el terreny i la generació d'aquests desprendiments rocosos (Dorren, 2003).

El moviment inicial és una caiguda lliure que pot acabar rebotant o rodant pel vessant. Quan el pendent del vessant és de més de 70° (Dorren, 2003) o 76° (Corominas, 2004; Cruden & Varnes, 1996), les porcions de material es desplaçaran en caiguda lliure. En canvi, si el pendent està entre aquests valors i els 45° , el blocs es mouran rebotant contra el vessant. Finalment, si el pendent presenta una inclinació inferior a 45° , aquests baixaran rodolant pel vessant, tal i com es mostra a la Figura 3. El rebot, però, a part de dependre de l'angle entre el pendent i la trajectòria del bloc després, també dependrà del tipus de material, concretament dels coeficients de restitució. Puntualment es pot donar el cas de que, en angles inferiors a 45° , el material llisqui pel vessant (Corominas, 2004).

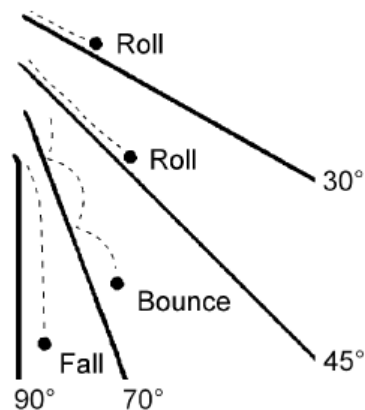


Figura 3. Diagrama amb el tipus de moviment dels blocs despresos en funció del grau d'inclinació del pendent. **Font:** (Dorren, 2003).

Focalitzant en la caiguda lliure, dins d'aquest tipus de moviment se'n poden distingir dos subtipus: la translació del centre de gravetat del bloc i la rotació del bloc al voltant del seu centre de gravetat. Tenir en compte aquests dos subtipus és important perquè generalment els blocs que cauen no són rodons de manera que, al xocar contra el vessant i rebotar, agafen noves trajectòries. Altres factors a tenir en compte podrien ser el fregament de l'aire, el qual s'ha demostrat en alguns estudis que no és significatiu sobre el moviment del bloc, i el fet de que diferents blocs que estan caient xoquin entre ells, cosa que és molt difícil d'analitzar quan succeeix (Dorren, 2003).

Pel que fa al rebot, en el primer que es produeix, els blocs formats per material incompetent solen trencar-se. Tanmateix, tant si es produeixi una ruptura com si no, s'ha estudiat i trobat que en aquest primer rebot es dissipa un 75-86% de l'energia guanyada durant la fase de caiguda lliure (Dorren, 2003).

Tal i com s'indica en la Figura 4, en el moment en que la porció de terreny després impacta contra el vessant es pot fragmentar en porcions més petites, les quals poden traçar noves trajectòries divergents (Corominas, 2004; Cruden & Varnes, 1996).

A part d'aquest moviment, generalment es produeix una transició gradual entre el rebot i el rodament degut a que el bloc pren impuls rotacional. Durant aquesta transició el bloc rota molt ràpidament de manera que només les arestes amb el major radi toquen el vessant. D'aquesta manera, el centre de gravetat es mou al llarg d'una trajectòria pràcticament recta, el qual és un moviment molt òptim pel que fa a la pèrdua d'energia i, de fet, la combinació de rebot curt i rodolament és un dels mecanismes més econòmics (Dorren, 2003). Tanmateix, una vegada el bloc ha deixat de rebotar, aquest ho pot tornar a fer si durant el rodolament passa per una zona del vessant més dura i la velocitat a la que baixa és considerable, reiniciant llavors la seqüència de caiguda lliure, rebot i rodolament o de rebot i rodolament (Cruden & Varnes, 1996). Finalment, en el cas del rodolament, el bloc quasi bé tota l'estona manté contacte amb el vessant (Dorren, 2003).



Figura 4. Esquema on es mostra com a vegades un bloc topa contra el vessant i es fragmenta en porcions més petites que tracen noves trajectòries similars a la inicial del bloc. **Font:** (Corominas, 2004).

Per últim, els casos on els blocs llisquen, es donen o just a l'inici dels desprendiments o justament al final de manera que, si mentre està lliscant el pendent augmenta, el bloc comença a caure, rebotar o rodolar. Si, en canvi, el pendent es manté, aquests s'acaben aturant degut a la pèrdua d'energia a conseqüència de la fricció (Dorren, 2003).

Després de tots aquests tipus de moviment de caiguda, els blocs sempre s'acaben aturant. El motiu principal és la disminució del pendent ja que a més pendent la velocitat s'accelera i a menys pendent la velocitat disminueix, tot i que en la velocitat del bloc també influeix la seva mida i el material que cobreix el vessant (sòl, roca, vegetació, etc.). A part, la pèrdua d'energia del bloc també es deu a les col·lisions i a les forces de fricció que actuen sobre el bloc després (Dorren, 2003).

A part, la mida del bloc influeix també en els blocs petits ja que la seva energia cinètica és menor i perquè aquests es poden aturar al topar-se contra un arbre o qualsevol altre obstacle més fàcilment (Dorren, 2003).

Pel que fa al material que cobreix el vessant, aquest pot canviar en molta poca distància. És per això que la força de fricció s'acaba definint millor per l'angle de fricció dinàmic. Aquest angle va en funció de la rugositat del vessant, i ho fa de la següent manera (Dorren, 2003):

$$\tan \phi_{\mu d} = \tan \phi_0 + k * d / (2 * R) \quad [1]$$

On $\phi_{\mu d}$ és l'angle de fricció dinàmic, ϕ_0 és l'angle de fricció interna (el qual es troba entre 20.3° i 33.8°), k és una constant que es troba entre 0.17 i 0.26, d és el diàmetre mitjà del solc en el pendent i R és el radi del bloc.

A més, quan en un mateix vessant s'hi produeix més d'un esdeveniment, en la zona on s'acaben aturant els blocs, aquests s'hi acumulen formant tarteres. Ocasionalment, es pot donar el cas en que aquestes tarteres es vegin afectades per un mecanisme de ruptura originant llavors corrents de blocs (Corominas, 2004).

Els moviments d'aquest tipus d'esllavissada, doncs, són molt ràpids i, en alguns casos, inclús arriben a ser extremadament ràpids. No obstant, la situació canvia quan la socavació que fa un riu o l'impacte de les onades contra el peu d'un vessant format per material cohesiu provoca petites esllavissades o bolcaments, els quals separen el material desplaçat del material inalterat que es queda intacte en el vessant (Cruden & Varnes, 1996).

Degut a que aquests fenòmens es solen donar en altes altituds i en parets o vessants escarpats, el seu accés és difícil. Conseqüentment, moltes vegades és molt complicat fer feines de subjecció dels blocs per evitar la generació de desprendiments de manera que s'acaba optant per no fer-ho i, a canvi, treballar en construccions, tècniques i tecnologies que permetin aturar els blocs que es desprenguin (pantalles dinàmiques, rases, murs, etc.) per evitar que acabin afectant vies de comunicació, serveis o zones urbanes, entre d'altres (Corominas, 2004).

2.2.3.3. Corrents d'arrossegalls

Els corrents d'arrossegalls s'engloben dins dels moviments de flux. Aquests últims, són moviments espacialment continus en els que les superfícies de cisalla són de curta durada, es troben molt a prop les unes amb les altres i, generalment, no es conserven. A més, la distribució de les velocitats en la massa desplaçada s'assembla a la dels fluids viscosos i, conseqüentment, la massa que es desplaça no conserva la forma en el seu moviment descendent de manera que, quan es tracta de materials cohesius, es creen formes lobulades i, quan són materials granulars, es formen cons de dejecció (Corominas, 2004; Cruden & Varnes, 1996). Per tant, el límit inferior de la massa desplaçada pot ser una superfície al llarg de la qual hi hagi tingut lloc un moviment diferencial apreciable o una zona de cisallament distribuït de guix important (Cruden & Varnes, 1996).

La diferència que hi ha entre una esllavissada i un flux és el contingut d'aigua, la mobilitat, i l'evolució del moviment. Una esllavissada d'arrossegalls, per exemple, pot esdevenir en un corrent d'arrossegalls si el material perd cohesió, guanya quantitat d'aigua i baixa per vessants amb pendents més elevats (Corominas, 2004; Cruden & Varnes, 1996).

Pel que fa als corrents d'arrossegalls en concret, aquests són moviments ràpids de material detrític, on predomina la fracció gruixuda (blocs, còdols, graves i sorres). A més, el contingut d'aigua és elevat i la fracció sòlida pot formar el 80% en pes de la massa en moviment. Aquests moviments poden baixar tant per vessants oberts com per incisions en el terreny les quals formen una espècie de canalització natural, de manera que acaben donant lloc a diferents morfologies. A part, degut a la poca cohesió del material, aquest s'escampa per la part inferior dels vessants creant dipòsits sense una morfologia en concret, tot i que, si es desplaça més o menys de forma canalitzada, acaba formant cons de dejecció (Corominas, 2004).

Els sòls granulars no cohesius tendeixen a col·lapsar en situacions de cisalla de manera que s'incrementa la pressió de porus en condicions no drenades. És per això que, conseqüentment, els col·lapses en sòls contractius sovint acaben formant corrents d'arrossegalls, els quals poden recórrer grans distàncies perquè, inclús una tensió menor, pot provocar líquüefacció (Dai et al., 2002).

A partir dels resultants de la simulació d'aquests esdeveniments, s'ha detectat que els factors condicionants de la distància de propagació són els coeficients de fregament basals, mentre que els factors que influeixen en la velocitat del flux són els corrents turbulents que s'hi formen (Hürlimann et al., 2008). A part, factors com el gradient del vessant, la possibilitat de canalització del flux i les característiques de la superfície del vessant per on es mou el corrent d'arrossegalls afecten en general al moviment d'aquest tipus de fenomen (Dai et al., 2002).

2.2.4. Mecanismes de propagació

2.2.4.1. Esllavissades

Les esllavissades es poden dividir en cinc fases (Montero, 2008): la preparatòria o incipient, la inicial, la de desenvolupament, la d'avançament i la d'esgotament. En totes les fases els moviments poden ser de velocitat molt variable, és a dir, poden anar des de lents a ràpids i poden ser constants o intermitents. A part, excepte en la fase d'esgotament, es poden quedar inactius durant llargs períodes de temps o inclús, en el cas de la inicial, la de desenvolupament i la d'avançament, pot ser que es quedin aturats indefinidament.

Tot i que, en cada cas i en cada zona, varien els factors com el tipus de material, la morfologia dels vessants, el règim de precipitacions, l'evolució del nivell freàtic i la activitat sísmica, entre d'altres, es pot dir que generalment en les cinc fases anteriorment citades es poden donar més o menys els indicis següents. En la fase preparatòria o incipient es poden notar canvis en brolladors i fonts, bombaments locals i esquerdes de tracció en la capçalera. En la fase inicial es poden apreciar sorolls, bombaments, extensions laterals de les esquerdes generades des de la coronació fins al peu de la massa que s'està desplaçant, enfonsaments locals, escarpaments perimetrals sovint en la zona de la capçalera, escarpaments menors en la massa que s'està movent i l'inici del front d'acumulació de dipòsits. En la de desenvolupament, es pot observar el desplegament de l'escarpament a la zona de l'encapçalament, un desplaçament de la massa esllavissada pendent avall, a més d'un enfonsament o una elevació de la capçalera i la situació oposada en el peu en funció de si és una esllavissa rotacional o translacional, respectivament. En la d'avançament es pot veure un desenvolupament de l'escarpament principal i la formació d'escarpaments menors al llarg de la massa que s'està desplaçant. A part, pot donar-se el cas en que l'escarpament principal remunti vessant amunt. Per últim, en la fase d'esgotament, es pot notar una acumulació de massa en la zona de descàrrega i una disminució del pendent mitjà del vessant, a part d'ensorrament de blocs en la zona de l'encapçalament i de l'escarpament (Montero, 2008).

Centrant-nos ara només en les esllavissades catalogades com a lentes, aquestes es poden donar en períodes de temps molt llargs gràcies a la presència d'un component viscos o de fluència que les fa estar en moviment tot i no haver canvis en la pressió de porus del terreny afectat. Sembla ser, de fet, que les esllavissades molt lentes i extremadament lentes més superficials vindrien donades per canvis en les condicions de contorn hidrològiques, mentre que les més profundes estarien condicionades per les propietats viscloses del sòl en qüestió. No obstant, aquestes esllavissades es poden transformar en ràpides o de caràcter més fluid si canvien les condicions de l'entorn (Mansour et al., 2011).

2.2.4.2. Despreniments rocosos

Tal i com exposen (Dorren et al., 2005), la propagació dels desprendiments rocosos és un procés complex i molt variable, així com també molt aleatori. Tal i com s'ha començat a veure en el punt 2.2.3.2, la propagació dels blocs es fa mitjançant lliscament, caient lliurement, rodolant i rebotant. No obstant, a la natura, la gran majoria de les trajectòries dels desprendiments es produeixen per vols lliures separats per rebots sobre el vessant. Els casos de

blocs que es propaguen rodolant de manera constant, és a dir, que el bloc està en contacte permanent amb la superfície del pendent, són molt poc freqüents degut a la forma irregular dels blocs i la rugositat del vessant. Així doncs, es pot dir que els blocs despresos es propaguen pel vessant mitjançant trajectòries balístiques.

Pel que fa a l'energia dels blocs, mentre es troben volant per l'aire, els fragments roten de manera que no perden energia (el fregament amb l'aire generalment es negligeix). En canvi, quan impacten contra el vessant sí que hi ha una pèrdua i repartiment important d'energia. Tot i així, el valor de la pèrdua depèn de les condicions d'impacte i, per tant, cada cas serà diferent.

Per tant, el factor clau de la propagació dels desprendiments rocosos és el rebot dels blocs. El rebot està determinat per la magnitud i l'orientació del vector de velocitat incident, la rugositat i el material que cobreix la superfície del vessant, la forma del bloc després, i la seva posició, orientació i velocitat angular en el moment precís de l'impacte.

Així doncs, les propietats mecàniques de la superfície del vessant també són un factor altament influent ja que la resposta del rebot pot variar molt en funció d'aquestes. Tant pot ser que es produeixin forces elàstiques recuperables si impacta sobre un material rocós, com que el bloc es fragmenti o es trenqui part de la roca del vessant, o que formi un cràter en materials tous de manera que s'acabi produint una dissipació substancial de l'energia del bloc.

Per altra banda, les propietats mecàniques dels blocs despresos no són tan influents com la superfície del vessant, a no ser que aquests s'acabin fragmentant. En aquest cas, els factors influents són la mida i la forma dels blocs, així com les transferències d'energia donades.

En el cas de que el rebot es doni en terrenys granulars, com són per exemple els talussos, aquest està fortament influenciat per la relació entre la mida i la massa del bloc després i la relació entre la mida i la massa mitjana de les partícules que formen la superfície del pendent, així com la orientació incident i la inèrcia del bloc.

2.2.4.3. Corrents d'arrossegalls

Segons (Cascini et al., 2014), la propagació dels corrents d'arrossegalls succeeix de la següent manera: (i) a l'entrada del canal l'alçada i la velocitat del flux augmenta. Aquests dos paràmetres poden ser més elevats si dos o més fluxos conflueixen. (ii) Al llarg del canal, hi ha una gran quantitat d'arrossegalls disponible per ser arrossegada per l'aigua que es precipiti quan plougui. A més, el mateix canal proporciona l'aigua que acaba fluïditzant aquests arrossegalls que s'hi troben dipositats. (iii) Al final del canal, la massa pot ser que s'aturi o que continuï propagant-se formant cons de dejecció. Per tant, sovint la direcció de propagació a partir d'aquest punt no es sol conèixer a priori.

Tal i com expliquen (Quan Luna et al., 2012), a l'inici del corrent d'arrossegalls, els materials arrossegats poden erosionar el canal i incorporar un volum varies vegades més gran que la massa inicialment mobilitzada. L'arrossegament es dona quan un flux es mou al llarg d'una capa de material erosionable exercint una tensió de cisallament superior a la que pot resistir, i tant es pot donar en intervals curts com de forma més continuada en grans àrees. Aquesta erosió de la superfície del vessant afecta al moviment de dues maneres diferents: per una banda, l'addició de massa al flux provoca una disminució de la força de fricció i de l'energia potencial del flux i, per l'altra, genera una força resistiva sobre la massa mòbil degut a la transferència de moment entre el flux en moviment i els arrossegalls situats a sobre de la superfície que s'han de mobilitzar i accelerar a la velocitat del flux.

Així doncs, l'addició de material en el corrent és un factor clau en la propagació ja que és capaç de canviar significativament la mobilitat, el volum i la reologia del flux. Aquesta última, i en concret la viscositat dinàmica, té una gran influència en la velocitat i en la distància de propagació, tot i que no sembla que influeixi tant en el procés d'arrossegament del material.

Els paràmetres que sí estan directament relacionats amb l'arrossegament són els del sòl in-situ tals com l'angle de fricció interna, la profunditat i la cohesió (Quan Luna et al., 2012).

A part, enllaçant amb el punt (ii), els arrossegalls que es troben disponibles en la superfície per on baixa el corrent són accelerats i introduïts dins el corrent pel mateix flux. Aquest arrossegament d'arrossegalls pot accelerar o desaccelerar la massa mòbil depenent de les característiques del material erosionable, la topografia del vessant i la dinàmica del flux (Quan Luna et al., 2012). Finalment, el corrent d'arrossegalls romandrà mòbil vessant avall fins que la combinació de la seva profunditat i el gradient del pendent l'indueixin a aturar-se (Whipple, 1992).

2.2.5. Mètodes per al càlcul del moviment o de la propagació

2.2.5.1. Esllavissades

Els mètodes quantitius per determinar la distància recorreguda de les esllavissades es poden classificar en dos tipus: els empírics i els racionals (Corominas et al., 2014).

Els mètodes empírics es basen en observacions fetes al camp per tal de fer relacions entre la morfologia, les característiques de la trajectòria i la distància de propagació de l'esllavissada. És per això que els mètodes per preveure la propagació d'aquestes es divideixen en dos subtipus diferents: els geomorfològics i els geomètrics (Corominas et al., 2014). Amb els primers es preveuen les distàncies de propagació de futures esllavissades a partir del mesurament de l'extensió d'antics i nous esdeveniments. Els desplaçaments de les esllavissades més o menys lentes es poden mesurar amb les metodologies presentades en la (Taula II. I de l'ANNEX II) (Mansour et al., 2011). I, amb els geomètrics, es fa una avaluació de la propagació analitzant les relacions entre els paràmetres de l'esllavissada donada i la distància recorreguda.

Pel que fa als mètodes racionals, aquests es basen en l'ús de mètodes analítics o numèrics, els quals presenten diferents graus de complexitat, i es divideixen en dos subtipus: els discrets i els continus (Corominas et al., 2014). Els primers s'utilitzen quan l'estructura de l'esllavissada és granular ja que el model permet representar els grans com a elements discrets i, els segons, es basen en la mecànica contínua de manera que poden combinar el comportament mecànic amb la hidràulica i la termomecànica de l'esdeveniment.

2.2.5.2. Despreniments rocosos

Pel que fa al càlcul de la propagació dels despreniments rocosos, existeixen diferents models els quals es poden classificar en quatre grups: models empírics, models analítics i models basats en Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG).

Actualment, hi ha un gran nombre de models del tipus empíric i del tipus analític. Els primers permeten obtenir una aproximació ràpida i senzilla de les zones de propagació dels despreniments a partir de relacions entre factors topogràfics i les longituds de les zones de propagació dels esdeveniments, mentre que els segons en fan un càlcul més acurat simulant o descrivint els modes de moviment dels blocs despresos al llarg dels vessants (Abbruzzese et al., 2009). Tanmateix, molts dels models analítics s'han aplicat en vessants concrets, majoritàriament aquells que han causat problemes a la societat. Alguns models, molt pocs, han

sigut desenvolupats per preveure zones de propagació de despreniments a escala regional. No obstant, sí que ho podrien fer els models basats en SIG. Aquest darrer tipus de model s'aplica seguint un procediment que consta de tres passos: en primer lloc identificar l'àrea font, és a dir, determinar les zones on es poden iniciar despreniments, en segon lloc calcular la trajectòria que seguirien els blocs despresos i, en tercer lloc, calcular la velocitat de propagació del despreniment per preveure l'extensió de les zones de propagació (Dorren, 2003).

2.2.5.3. Corrents d'arrossegalls

En aquest cas, els mètodes aplicats es classifiquen en tres tipus: els empírics, els analítics i els numèrics (Dai et al., 2002; Hürlimann et al., 2008).

Els mètodes empírics són aplicables per preveure la distància de propagació de l'esdeveniment, així com la seva distribució al llarg del vessant. Es basen en observacions fetes al camp i identifiquen les relacions entre el volum del fenomen, la morfologia local, la presència d'obstruccions i la distància de propagació (Cascini et al., 2014; Dai et al., 2002).

Els mètodes analítics descriuen el comportament físic del moviment dels corrents d'arrossegalls analitzats. Ho fan mitjançant equacions derivades de la dinàmica de sòlids i de fluids, de manera que la velocitat i l'alçada del flux tant es poden determinar segons els models eulerians com amb els lagrangians (Cascini et al., 2014; Dai et al., 2002).

Per últim, els mètodes numèrics descriuen el moviment dinàmic de l'esdeveniment i/o fan un model reològic per descriure el comportament dels arrossegalls a partir de les equacions de conservació de massa, moment i energia dels esdeveniments considerats (Dai et al., 2002).

A partir de l'estudi fet per (Hürlimann et al., 2008), es va concloure que els mètodes empírics són aptes per estimar la distància total de propagació, tot i que incorporin incerteses i només siguin vàlids per a les condicions donades. I, també, que els mètodes analítics calculen els valors de velocitat de manera similar als mètodes numèrics, de manera que els analítics poden ser una bona eina per fer anàlisis preliminars del comportament dels fluxos mentre que els numèrics, els quals són més complexos i per tant requereixen més temps per fer els càlculs, s'haurien d'aplicar en el cas que s'haguessin de trobar els valors exactes d'intensitat.

2.2.6. Factors desencadenants

2.2.6.1. Esllavissades

El factors desencadenants més freqüents són les pluges, sobretot si són intenses i prolongades, seguit de les accions antròpiques. Després ve l'ompliment i les fluctuacions estacionals dels nivells dels embassaments, els quals controlen l'estabilitat dels vessants que es troben aigües amunt. Per últim, estan factors com l'activitat sísmica o el desglaç de la neu. Per tant, només amb el fet de construir bons sistemes de drenatge ja es poden prevenir bona part dels esdeveniments d'aquest tipus (Mansour et al., 2011).

2.2.6.2. Despreniments rocosos

Els factors desencadenants en aquest cas recauen en els processos de gel i desgel que es produeixen tant en la superfície exterior com a l'interior de les fractures del massís rocós, l'activitat sísmica, la pluja, la penetració de les arrels en el substrat, la descompressió al desfer-se el gel i l'activitat antròpica i biològica. A part, les propietats geotècniques del substrat rocós també juguen un paper important (Dorren, 2003).

2.2.6.3. Corrents d'arrossegalls

En aquests altres casos, els factors desencadenants solen ser les precipitacions, ja siguin molt intenses o molt prolongades en el temps, degut a que acaben saturant el sòl i, per tant, comprometen l'estabilitat del vessant. A part, també influeixen factors com la fusió de la neu o del gel, o l'angle del pendent del vessant (Blahut et al., 2010; Fuchs et al., 2007; Jakob et al., 2012; Nefeslioglu & Gokceoglu, 2011; Quan Luna et al., 2014).

2.2.7. Magnitud i intensitat

A l'hora de quantificar una esllavissada es poden utilitzar dos conceptes diferents en funció de la característica que es vulgui destacar. Si es vol considerar la grandària de massa que s'ha desplaçat es parlarà de magnitud mentre que, si es vol tenir en compte el grau de dany o destrucció que ha provocat el fenomen sobre l'entorn, es parlarà d'intensitat.

Per tant, aquests dos termes es poden definir de la següent manera:

- Magnitud: indica la mida de l'esllavissada a partir del volum desplaçat o l'àrea afectada. Es mesura amb unitats de volum o àrea. La seva determinació es fa a partir del reconeixement del terreny.
- Intensitat: un conjunt de paràmetres especialment distribuït que descriuen la capacitat de destrucció de l'esllavissament (Hungar, 1997). Aquests paràmetres són descriptors, els quals venen donats pels mecanismes de propagació de cadascun dels tipus d'esllavissada, pel que poden ser unitats de desplaçament, velocitat, energia cinètica, etc. Per fer una avaluació de la intensitat s'ha de treballar amb models dinàmics, els quals tenen com a paràmetre d'entrada el volum de l'esllavissada, ja que aquesta varia al llarg del recorregut. Així doncs, la mesura o el càlcul de la intensitat no és una tasca senzilla degut a que no és una característica intrínseca de l'esdeveniment en qüestió (Corominas et al., 2014) i, a part, no es distribueix uniformement a l'espai.

Aquests conceptes, però, no sempre s'entenen d'aquesta manera tan diferenciada. Tot i que recentment s'ha començat a fer una distinció més evidenciada entre ells, i s'està treballant més en termes d'intensitat quan s'està avaluant el grau de dany causat per un d'aquests fenòmens, és fàcil trobar estudis al llarg de la història on s'ha tingut en compte la magnitud per fer anàlisis de vulnerabilitat. Exemples d'això es mostren a continuació:

"According to Varnes and his IAEG collaborators (1984), landslide vulnerability is the degree of loss to a given element—or a set of elements—at risk resulting from the occurrence of a landslide of a given magnitude in an area." (Galli & Guzzetti, 2007)

"This article presents a simple method for prediction of damage in a structure impacted by a debris flow of known magnitude." (Haugen & Kaynia, 2008)

"In engineering and natural sciences, physical vulnerability is commonly expressed as the expected degree of loss to a given element at risk, particularly to built structures, resulting from the occurrence of a hazard of a given magnitude." (Akbas et al., 2009)

"The vulnerability of buildings and people is determined depending on the process and its magnitude." (Papathoma-Köhle et al., 2011)

“It is well known that during the landslide event, a building may be completely destroyed, partially damaged or affected by deformation or inclination. The factors that influence the degree of impact are: (1) the type of movement, its location, and its magnitude (in terms of volume and velocity); and (2) the building category, age, height/size, and type of foundation. Another important factor affecting the vulnerability of a building is its location relatively to the landslide body.” (Antronico et al., 2015)

“With reference to the definition given in the *Reference risk model* section, hazard corresponds to the probability of occurrence, in the reference time interval, of a hazardous event of a given magnitude.” (Uzielli et al., 2015b)

“The concentrations of property on steep slopes, high standard of living and increasing population density all of which lead to society being more vulnerable to landslides, even those of small magnitude (Blöchl & Braun, 2005).” (Petrucchi & Gullà, 2010)

En aquest últim fragment, deixat per al final, es fa una reflexió que dona peu a que molts experts creguin que s'estan confonent els dos conceptes. Pel que es pot veure, moltes vegades s'ha aplicat el concepte magnitud quan sembla que realment s'estan referint a la intensitat. Per tant, d'aquí sorgeix la reflexió i discussió de si convé treballar més per donar a conèixer les dues definicions clarament diferenciades entre aquests conceptes per tal d'evitar que es segueixin aplicant erròniament o es confonguin.

A part, tal i com es comenta en el darrer fragment, esdeveniments de petita magnitud poden causar danys importants a l'entorn. Moltes vegades es tendeix a pensar equivocadament que grans magnituds ocasionen grans danys i viceversa, quan en realitat es pot donar el cas contrari. D'això mateix també en parlen (Corominas et al., 2014):

“Even though it may be expected that the larger the landslide, the higher the potential for damage, this does not hold true in all cases.” (Corominas et al., 2014)

Així doncs, aquesta falsa creença sorgeix justament de la confusió entre els dos conceptes anteriorment citats.

Si s'entenen tal i com s'han definit al començament d'aquest punt, i s'agafa la intensitat com a descriptor de la capacitat de produir dany, pren sentit el fet de pensar que la mida de l'esllavissada, és a dir la magnitud, no és suficient per definir la capacitat destructiva del fenomen. En canvi, la intensitat que es defineix, principalment, mitjançant desplaçaments, energies cinètiques i velocitats, si que ho fa, i resulta necessària per al càlcul de la vulnerabilitat dels elements exposats a esllavissades.

De manera que, per exemple, es pot donar el cas d'una esllavissada lenta d'uns quants milions de metres cúbics (una gran magnitud) que es desplaça uns pocs mil·límetres a l'any (una baixa intensitat), que com a resultat acabi causant només danys lleus a edificis i cap ni un a les persones. Per altra banda, es pot donar el fet de que es desprengui un bloc de roca d'uns centímetres cúbics (magnitud petita) que caigui vessant avall a una velocitat d'unes quantes desenes de metres per segon (intensitat alta) i provoqui danys greus a persones, o inclús la mort.

Conseqüentment, la vulnerabilitat vindria determinada pel nivell d'intensitat més que per la magnitud de l'esdeveniment. És per això que es recomana treballar amb intensitats sempre que es vulgui enfocar l'estudi en base al potencial destructiu de l'esdeveniment.

Tanmateix, s'ha de dir que no sempre resulta ser una tasca senzilla el fet de catalogar les intensitats dels fenòmens i, per això, s'entén que a vegades s'opti per treballar en termes de magnituds depenent de les característiques de cada cas.

Vist això, doncs, la intenció d'aquest projecte és trobar una escala d'intensitat que permeti catalogar els fenòmens com a més o menys destructius, independentment de les característiques dels elements afectats.

Per entendre-ho millor, es pot posar l'exemple del mal que pot provocar un cop de puny. Si ens fixem amb l'emissor, si aquest és una persona adulta que, a més, està forta segurament donarà un cop de puny més fort i amb més energia que si el dona un nen petit. Per tant, clarament diríem que el cop de puny més intens seria el que emet l'adult.

Per altra banda, si ens fixem amb el receptor i plantegem que un adult i un nen reben un cop de puny amb les mateixes característiques, pensarem que el nen serà el més perjudicat.

Vist així, doncs, no és el mateix mirar-ho des del punt de vista de qui ho fa que des del punt de vista de qui ho rep, i el mateix passa amb les esllavissades. Es pot catalogar la capacitat destructiva del fenomen a partir de les seves pròpies característiques (velocitat a la que es mou, alçada del flux, diàmetre del bloc que es desprèn, etc.) o, en canvi, a través de les característiques dels elements que l'han patit, tal i com es fa en moltes ocasions (finestres trencades, parets enderrocades, edificis parcialment col·lapsats, etc.), els danys dels quals poden estar condicionats pel tipus de material de construcció, l'antiguitat, el número de plantes, l'estat dels fonaments i dels elements estructurals, etc.

Així és com es fa en moltes ocasions. Es fan estudis d'esdeveniments una vegada ja han succeït calculant la vulnerabilitat en funció de la intensitat a partir d'aproximacions empíriques, és a dir, prenent dades posteriors a l'esdeveniment com són: el grau de destrucció dels edificis de la zona, les pèrdues humanes, el cost de les pèrdues materials o el cost de les reconstruccions, entre d'altres, ja que mentre l'esdeveniment s'està produint és possible que sigui difícil aconseguir les dades necessàries (velocitats, pressions d'impacte, etc.). Aquesta manera de treballar, doncs, pot semblar efectiva però en el fons no és la més adient.

Veient això, doncs, sembla lògic que sempre que s'hagi de definir la intensitat d'un esdeveniment, es determini a partir de les seves propietats intrínseques en comptes de focalitzar-se i dependre dels elements exposats. Tanmateix, però, és comprensible que, degut a que molts d'aquests estudis són encarregats o duts a terme per les administracions (les quals han de valorar els costos dels danys provocats pels esdeveniments per tal de calcular la quantitat de diners que s'hauran d'invertir per reparar i reconstruir els danys causats), es tendeixi a catalogar els fenòmens a partir de l'observació dels desperfectes que han causat.

Per últim, abans d'acabar aquest apartat, és convenient citar el següent fragment:

"For a landslide, the magnitude can be defined with several parameters including volume, velocity, depth, run-out, and area extent (Ojeda-Moncayo et al., 2004; Lee & Jones, 2004). It is considered that for a landslide event, we have one magnitude value but infinite intensity values. Intensity can be expressed in terms of either impact energy, average velocity, or depth of potentially erodible soil zones (Amatruda et al., 2004)." (Li et al., 2010).

On destaca la frase que diu que per a un esdeveniment tenim un sol valor de magnitud però infinits valors d'intensitat. Això ajuda a entendre perquè és més senzill treballar amb magnituds en comptes de fer-ho amb intensitats, i reflecteix la complexitat que presenta l'acció de determinar uns nivells d'intensitat.

Amb aquest últim comentari, doncs, es presenta una altra de les problemàtiques que hi ha actualment relacionades en l'àmbit de les esllavissades. Tot i que hi ha la voluntat d'establir unes escales d'intensitat estàndard, així com passa amb l'escala de Mercalli o de Richter, les quals són escales estandarditzades que s'utilitzen a nivell mundial per determinar respectivament la intensitat i la magnitud dels terratrèmols, també està la necessitat de crear-les dins el camp de les esllavissades per tal de simplificar els estudis dedicats a la determinació dels seus nivells d'intensitat.

Per tant, amb el present projecte, es pretén assolir l'estandardització d'unes escales d'intensitat tant per a esllavissades, com per a desprendiments rocosos i corrents d'arrossegalls, a part de tenir en compte que alhora puguin permetre l'establiment d'equivalències entre elles i entre altres fenòmens naturals com són els terratrèmols, les allaus o les avingudes.

2.2.8. Perillositat i susceptibilitat

La possibilitat o probabilitat d'ocurrència de que es produeixi una esllavissada d'una determinada capacitat destructiva en una àrea determinada i en un període de temps donat és el que es defineix com a perillositat (Montero, 2008). La probabilitat d'ocurrència és la inversa del període de retorn i es pot expressar tant en termes anuals com de llarg termini.

Així doncs, l'avaluació de la perillositat suposa treballar amb probabilitats a l'hora de fer prediccions temporals i espacials, la qual cosa no sempre és fàcil ja que requereix tenir reculls de successos anteriors, a part dels seus factors desencadenants, volums, abast i velocitats.

És per això, que en funció de la finalitat d'alguns estudis a petita escala, a vegades es fa un anàlisi espacial de susceptibilitat per tal d'identificar i delimitar aquelles àrees que presenten factors relacionats amb els processos d'inestabilitat, les quals són més propenses a veure's afectades per un fenomen d'esllavissada (Montero, 2008).

Per analitzar la susceptibilitat es poden aplicar dos mètodes d'avaluació: els qualitius, que es basen en dades preses directament de l'observació a camp i d'inventaris, i els quantitius, que es fan a partir de càlculs probabilístics provant combinacions de diferents factors o modelitzant els processos de lliscament dels vessants.

La perillositat, doncs, calcula la probabilitat d'ocurrència d'una esllavissada en un vessant, mentre que la susceptibilitat fa una valoració del grau d'estabilitat del vessant.

2.3. Risc d'esllavissada

2.3.1. Equació del risc d'esllavissada

Després de la realització de varis estudis sobre el tema per part de diferents autors al llarg de la història (Agliardi et al., 2009; Akbas et al., 2009; Corominas et al., 2014; Ferlisi et al., 2016; Fuchs et al., 2007; Jakob et al., 2012; Mavrouli & Corominas, 2010b; Nefeslioglu & Gokceoglu, 2011; Uzielli et al., 2015b), acaba sortint una equació per tal de poder calcular un valor probabilístic del risc per a qualsevol situació donada. Tot i que cadascú l'expressa amb caràcters diferents, tots coincideixen amb els mateixos factors, els quals s'exposen a continuació.

De totes les equacions que es poden trobar a la bibliografia però, s'ha agafat com a referència la presentada per (Agliardi et al., 2009):

$$R = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P(L)_j \times P(T|L)_{ij} \times P(I|T)_i \times V_{ij} \times W_i \quad [2]$$

On $P(L)_j$ és la probabilitat d'ocurrència d'una esllavissada amb una magnitud j ; $P(T|L)_{ij}$ és la probabilitat de que una porció de l'esllavissada amb un volum j afecti a un element de risc i ; $P(I|T)_i$ és la probabilitat de que un element de risc donat es trobi situat dins la zona d'abast de l'esllavissada en el moment precís en que es produeixi el fenomen; V_{ij} és la vulnerabilitat que presenta l'element exposat i a rebre l'impacte d'una esllavissada amb un volum j ; i W_i és el valor econòmic de l'element de risc i .

Per tant, analitzant aquesta equació es pot observar que el risc d'esllavissada ve donat per un conjunt de factors que són, principalment: la probabilitat que es produeixi el fenomen d'una determinada dimensió, l'exposició de l'element donat a la seva trajectòria i la seva vulnerabilitat, i el cost econòmic dels elements exposats. Seguidament, s'expliquen amb més detall aquests factors determinants del risc.

2.3.2. Components de la fórmula del risc d'esllavissada

2.3.2.1. Perill d'esllavissada

Un dels components principals del risc és la probabilitat de que es produeixi una esllavissada d'un volum determinat, la qual es coneix com el perill d'esllavissada. Una bona definició d'aquest perill és la que presenten (Corominas et al., 2014), la qual el descriuen com a una condició amb el potencial per provocar una conseqüència no desitjada. A més, afegeixen que tota caracterització de perill en una esllavissada ha d'incloure la localització, el volum o l'àrea, la classificació i la velocitat del material esllavissat, així com la probabilitat de la seva ocurrència en un període de temps donat.

Aquest perill ve determinat per una sèrie d'atributs, els quals presenten per naturalesa algunes incerteses, com són les propietats del sòl o la roca, la geometria del pendent i la cinemàtica del moviment. Aquests factors, doncs, són els que controlen l'inici d'un moviment en el terreny.

No obstant això, existeixen components detonadors que contribueixen favorablement a que s'iniciï l'esllavissada com són, per exemple, les precipitacions, els sismes, les activitats antròpiques, els canvis de temperatura o algunes propietats del terreny, entre d'altres.

2.3.2.2. Anàlisi del perill d'esllavissada

L'anàlisi del perill té com a objectiu principal estimar les zones que es poden veure afectades per una esllavissada d'un cert tipus, volum, abast i intensitat en un període de temps donat. Per fer-ho, es determina una escala, una metodologia i uns resultats (Corominas et al., 2014).

Aquest anàlisi es pot especificar en funció de les àrees d'estudi de la següent manera:

- Anàlisi areal. S'utilitza en estudis a escala local i regional. El perill és avaluat a cada unitat del terreny (píxel, cel·la, conca, etc.) i el temps d'ocurrència es defineix en termes relatius com el nombre d'esllavissades per unitat d'àrea (km^2 , píxel, etc.) i per any. A més, també s'integra la intensitat combinant els elements de sortida amb l'anàlisi de l'abast.

- Anàlisi lineal. S'aplica en casos on intervenen infraestructures lineals com carreteres, vies de tren, canonades, cablejat elèctric, etc. L'anàlisi es pot dur a terme a les àrees donades però, normalment, es centren en les esllavissades potencials que poden afectar les infraestructures. El perill ve definit pel nombre d'esllavissades d'una donada magnitud que arriben a afectar aquestes infraestructures per unitat de longitud i per any, o com el nombre total d'esllavissades per any que es produeixen en tot el tram.
- Anàlisi orientat a objectes. En aquest últim cas, l'anàlisi es centra en punts específics de les àrees d'estudi com ventalls al·luvials, talussos, o altres elements exposats. Aquí, el perill s'analitza només en aquelles esllavissades que poden afectar els determinats punts específics a estudiar.

I pot ser de dos tipus diferents:

- Explícit espacialment. S'aplica en estudis fets a petita escala (orientades a objectes) amb Models Digitals d'Elevació del terreny (DEMs) que permeten el càlcul de la probabilitat d'ocurrència d'una esllavissada, i poden incloure o no l'anàlisi de l'abast i el seu posterior càlcul d'intensitat.
L'abast no s'inclourà quan es tracti normalment d'esllavissades geogràficament contingudes, com per exemple les esllavissades lentes o de poc abast, ja que generen desplaçaments relativament petits que no es poden representar fora de la unitat espacial analitzada (píxels, cel·les, etc.), o quan es tracti d'analitzar el perill per a elements lineals o puntuals situats lluny de la zona d'iniciació del fenomen degut a que, en aquest cas, el perill es determinarà a partir de la observació d'antics esdeveniments. En tot cas, però, la intensitat no es calcularà.
En canvi, sí que s'inclourà l'anàlisi de perill d'iniciació i d'abast de l'esllavissada quan es tingui en compte la distribució espacial de la intensitat, com passa per exemple amb els desprendiments rocosos, que presenten diferents distribucions d'intensitat i de probabilitat d'impacte en funció del volum de roca després, de la trajectòria seguida i de la seva energia cinètica o d'impacte, o com també passa amb els corrents d'arrossegalls ja que la distribució de la intensitat ve donada per la seva dinàmica.
- No explícit espacialment. Aquest cas s'aplica quan es treballa a escala regional i nacional, les quals no permeten arribar al detall per poder analitzar l'estabilitat de petites àrees (com seria l'estudi del perill d'esllavissada d'un talús de carretera). És per això que aquest tipus d'anàlisi normalment s'efectua en casos d'esllavissades superficials, els quals es poden suposar com a esdeveniments recurrents al llarg del temps que es produeixen a partir de fractures o altres irregularitats en el terreny disperses per tota la zona, o a partir de factors desencadenants (com terratrèmols o fortes tempestes) que actuin sobre aquesta gran àrea d'estudi.

2.3.2.3. Avaluació del perill d'esllavissada

El perill s'avalua determinant la probabilitat espacial i temporal d'ocurrència d'esllavissades produïdes dins d'una àrea d'estudi determinada a partir dels mecanismes de propagació, les magnituds i les intensitats respectives, així com de les freqüències, els períodes de retorn i les probabilitats d'excedència dels fenòmens (Corominas et al., 2014).

Existeixen dues opcions per fer aquesta quantificació del perill: mitjançant relacions magnitud-freqüència o a partir de relacions intensitat-freqüència.

Relacions magnitud-freqüència

Històricament, a la pràctica, s'ha observat una relació entre la magnitud de l'esdeveniment i la seva freqüència: la freqüència dels esdeveniments grans és baixa mentre que la dels petits és més elevada, tal i com es mostra a la Figura 5.

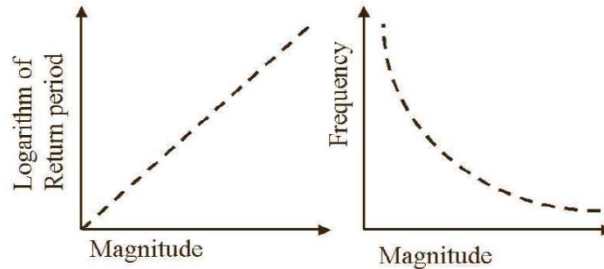


Figura 5. Gràfics on es representa la relació Magnitud-Freqüència de la majoria dels desastres naturals, incloent les esllavissades. **Font:** (Van Westen, 2009).

No obstant això, les relacions magnitud-freqüència (a partir d'ara relacions M-F) són la base de l'avaluació quantitativa del perill ja que, per tal d'avaluar quantitativament el perill d'esllavissada, cal una correcta avaluació de la probabilitat d'ocurrència expressada en termes de freqüència anual de fenòmens d'una donada magnitud (Corominas et al., 2014).

Aquesta relació, però, no és nova de les esllavissades sinó que la primera en establir-se degudament va ser dins del camp de la sismologia, quan es va observar que hi havia una relació entre la magnitud del terratrèmol i la freqüència acumulada (equació Gutenberg-Richter), la qual es va definir matemàticament de la següent manera (Corominas et al., 2014):

$$\log N(m) = a - bM \quad [3]$$

On $N(m)$ és el nombre acumulat de terratrèmols amb magnituds iguals o superiors a M , i a i b són dues constants que depenen de les característiques de l'esdeveniment estudiat.

Tornant ara a les esllavissades, es va trobar que la magnitud en front a la freqüència acumulada dels fenòmens és invariant d'escala, pel que la relació segueix una llei equivalent a la de Gutenberg-Richter per a un gran rang de magnituds, la qual s'expressa així:

$$N_{CL} = CA_L^{-\alpha} \quad [4]$$

On N_{CL} és el nombre acumulat d'esllavissades de magnitud igual o superior a A , A_L és la magnitud de l'esllavissada, la qual s'expressa normalment com la seva mida (volum o àrea), i C i α són dues constants.

I es va obtenir una equació similar pels casos de distribucions no cumulatives d'esllavissades:

$$N_L = C'A_L^{-\beta} \quad [5]$$

On N_L és el número no acumulat d'esllavissades de magnituds igual o superiors a A , A_L és la magnitud de l'esllavissada, la qual s'expressa normalment com la seva mida (volum o àrea), i C' i β són dues constants.

S'ha de considerar, però, que les lleis de potència es poden ajustar a la distribució de freqüència de les esllavissades d'una donada magnitud, la qual es troba per sobre d'una magnitud límit definida. Si en canvi està per sota d'aquest límit, es pot produir una desviació de la llei de manera que s'acaben subestimant els esdeveniments més petits.

Pel que fa al càlcul de les relacions M-F, en el cas d'anàlisis a escala regional es poden obtenir mitjançant la intensitat dels factors desencadenants i la magnitud de les esllavissades, la qual es pot determinar a partir del número total d'esdeveniments per la densitat d'àrea d'aquests (número d'esllavissades/km²), o també mitjançant l'anàlisi de fotografies aèries o imatges captades per satèl·lit.

Per altra banda, si es tracta d'escales locals, s'ha de tenir en compte que la relació M-F pot variar depenent del punt que es vulgui analitzar, perquè la calculada al punt d'origen pot ser diferent a la que calculada en un altre punt del vessant, ja que el volum de terra esllavissada influeix en la distància recorreguda i en l'àrea total que acaba cobrint. Conseqüentment, la freqüència d'esllavissades en qualsevol unitat de terreny ve definida per la ocurrència de ruptura d'un vessant i la probabilitat de patir esllavissades provinents de zones contigües.

No obstant això, la fiabilitat de les corbes magnitud-freqüència (a partir d'ara corbes M-F) recau en els inventaris i les bases de dades d'antigues esllavissades. Llavors, el fet de que la majoria dels pocs inventaris existents continguin dades estimades o incompletes, i que els registres d'esdeveniments en llocs específics no sempre siguin factibles per a grans àrees, fa que l'ús d'aquestes relacions quedi limitat.

A part d'això, no s'haurien d'acceptar aquelles corbes M-F derivades d'un inventari elaborat a partir d'una sola fotografia aèria o imatge per satèl·lit, o d'una sola campanya de camp, degut a que aquest tipus d'inventaris no mostren les freqüències reals de diferents magnituds d'esllavissada. A més, molts dels senyals que deixa el pas d'una esllavissada acaben desapareixent amb l'erosió, i no es tenen en compte per possibles casos de reactivació d'aquests fenòmens, que alhora poden afectar a grans moviments de terra.

Per tant, fins que no es demostrï que el grau d'ocurrència de petites esllavissades en una donada regió es aplicable per a la predicció del grau d'ocurrència de grans esllavissades o viceversa, s'ha d'anar molt en compte a l'hora d'obtenir aquestes relacions perquè es poden cometre grans errors.

Així doncs, les relacions M-F estan bé, però tal i com s'exposa dins el punt 2.2.7, la millor manera de determinar el grau de perill d'una esllavissada és a partir de la seva intensitat i, de fet, els valors de magnitud no són adequats per ser aplicats en les corbes de vulnerabilitat. Tal i com s'explica en el punt 2.3.2.8, les corbes de vulnerabilitat indiquen la vulnerabilitat física dels elements en funció de la intensitat de l'esdeveniment i el posterior grau de danys provocat (Papathoma-Köhle, 2016).

Per tant, que per calcular una probabilitat o una freqüència d'esllavissada mitjançant corbes de vulnerabilitat (veure punt 2.3.2.8), seria necessari fer una avaluació de la intensitat.

Relacions intensitat-freqüència

El càlcul de la intensitat varia en funció del tipus d'esllavissada ja que també varien les característiques intrínseques de cadascun. És per això que també es fan distincions a l'hora d'emprar els mètodes per obtenir relacions intensitat-freqüència (a partir d'ara relacions I-F), sempre en funció del tipus de fenomen i de l'escala de l'anàlisi.

Així doncs, en el cas de treballar amb esllavissades individuals en una escala local, es poden simular varis escenaris de perill (provant diferents volums) i les respectives probabilitats mitjançant models numèrics per tal d'obtenir la distribució espacial de les intensitats durant els moviments de terra. D'aquesta manera, doncs, és possible l'elaboració de corbes d'intensitat-freqüència (a partir d'ara corbes I-F) per cada punt de l'estudi, a partir dels valors de freqüència obtinguts amb les relacions M-F i les intensitats calculades mitjançant models numèrics.

En el cas d'analitzar vessants inestables que mostren indicis de presentar esllavissades en diferents punts, es calcula la intensitat en cadascun dels punts potencials a partir de models numèrics aplicant una distribució de valors, en comptes de fer-ho amb un sol valor per a cada escenari de freqüència. Per tant, les corbes I-F s'obtenen a partir del valor d'intensitat trobat amb el model numèric i la freqüència derivada de les relacions M-F.

Una esllavissada pot presentar més d'un valor d'intensitat al llarg del seu recorregut i aquests models numèrics utilitzats per trobar un valor d'intensitat ho poden fer calculant un valor mitjà amb tots els valors del fenomen donat (Agliardi et al., 2009) o, simplement, agafant el valor màxim del total (Calvo & Savi, 2009). Tant un com l'altre, però, genera bastantes incerteses.

En el cas de treballar amb la mitjana aritmètica, només es podrà considerar que està ben aplicada quan la distribució de valors representi valors d'intensitats normalment distribuïts i, pel que fa a la opció de l'elecció del valor més elevat, normalment en resultarà una sobreestimació del perill real degut a que es treballarà amb valors extrems (Corominas et al., 2014).

Tanmateix, pel que fa a l'obtenció de relacions I-F en casos de desprendiments rocosos, es treballa amb distribucions de probabilitats distribuïdes de les energies cinètiques dels fenòmens per a unes àrees determinades i els volums dels escenaris donats. Llavors, es pot analitzar la convergència de trajectòries de diferents blocs despresos dins d'una mateixa zona a partir de models 3D de desprendiments i trobar, així, la freqüència distribuïda de l'energia cinètica, com fan per exemple (Abbruzzese & Labiouse, 2014).

Vist això doncs, queda clar que una de les principals diferències de les dues opcions és la manera amb la que s'obtenen. Les relacions M-F s'obtenen a partir d'informació del camp i d'inventari, mentre que les relacions I-F s'aconsegueixen a partir de càlculs i models numèrics. Per tant, al no dependre de dades històriques, que, en molts casos són escasses, les relacions I-F sempre es podran obtenir amb una certa fiabilitat a diferència de les relacions M-F.

A més a més, s'ha de tenir en compte que en el fons l'objectiu principal de la quantificació del perill és la determinació dels danys que provoquen les esllavissades i, precisament, això és el que s'obté de les relacions I-F.

2.3.2.4. Elements exposats

L'exposició d'un element és la probabilitat temporal i espacial que té de trobar-se dins la trajectòria d'una esllavissada. El seu càlcul vindrà determinat per l'escala de l'anàlisi i el tipus d'element exposat.

Aquests elements tant poden ser tangibles, és a dir, es poden identificar, localitzar, cartografiar i quantificar (persones, carreteres, vehicles, línies d'electricitat, etc.), com intangibles, aquells més difícils de quantificar o cartografiar perquè no tenen una dimensió espacial (bens culturals, condicions psicològiques, benestar, etc.).

Segons qui estudia el fenomen, es fa una classificació o una altra dels elements exposats. Hi ha qui els classifica entre elements físics, econòmics, socials i ambientals (Asian Disaster Preparedness Center (ADPC), qui en canvi els separa en elements físics, subministraments, infraestructures, sistemes d'emergència, població, aspectes socioeconòmics, activitats econòmiques i elements ambientals o, per exemple, qui els agrupa per sectors com fa (Villagrán de Leon, 2006) tal i com diu (Van Westen, 2009). També està l'agrupació que fan (Corominas et al., 2014) basada en elements estàtics i elements dinàmics o la feta pel Subcomitè de la Gestió del Risc d'Esllavissades de la Societat Australiana de Geomecànica (AGS) (AGS Sub-Committee, 2000) la qual es divideix en propietats, persones, serveis, carreteres i vies de comunicació i vehicles que es troben en les carreteres.

En qualsevol cas, aquests elements s'exposen als diferents tipus d'esllavissades tal i com es mostra a la Figura 6.

Type	Before	After	Likely damage to elements at risk	Factors determining risk
Impact by large rockmass			Buildings: Total collapse likely Persons in buildings: Loss of life / major injury likely Infrastructure: Coverage and obstruction / destruction of surface Persons in traffic: Loss of life / major injury possible	<ul style="list-style-type: none"> • Volume of rockfall mass • Location of source zone • Distance to Elements at risk • Triggering factors • Local topography along track • Intermediate obstacles • Precursory events
Impact by single blocks			Buildings: Total collapse not likely. Localized damage Persons in buildings: Minor to major injury likely Infrastructure: Coverage and obstruction of traffic Persons in traffic: Loss of life / major injury possible	<ul style="list-style-type: none"> • Volume of rockfall blocks • Number of rockfall blocks • Location of source zone • Distance to Elements at risk • Triggering factors • Local topography along track • Intermediate obstacles
Impact by landslide mass			Buildings: Collapse / major damage depending on volume Persons in buildings: None, persons are normally able to escape Infrastructure: Coverage and obstruction of traffic Persons in traffic: None, persons are normally able to escape	<ul style="list-style-type: none"> • Volume of landslide mass • Water content • Landslide material type • Triggering factors • Distance to Elements at risk • Local topography along track • Speed of landslide movement
Loss of support due to undercutting			Buildings: Collapse / major damage likely Persons in buildings: None, persons are normally able to escape Infrastructure: Complete destruction of road surface. Persons in traffic: None, persons are normally able to escape	<ul style="list-style-type: none"> • Volume of landslide mass • Water content • Landslide material type • Triggering factors • Retrogressive landslide • Cliff erosion • Speed of landslide movement
Differential settlement /tilting due to slow movement			Buildings: Tilted buildings with cracks. Normally no collapse Persons in buildings: None, slow movement. People not in danger Infrastructure: Tilting and cracks, traffic slowed down Persons in traffic: None, slow movement	<ul style="list-style-type: none"> • Volume of landslide mass • Water content • Landslide material type • Triggering factors • Speed of landslide movement • Amount of displacement
Impact by debris flow on slope			Buildings: Filled by mud, damage to contents Persons in buildings: Minor-major injuries. Depends on speed. Infrastructure: Coverage of road surface. Obstruction of traffic. Persons in traffic: Minor-major injuries. Depends on speed.	<ul style="list-style-type: none"> • Volume of landslide mass • Water content • Slope steepness • Local topography • Landslide material type • Triggering factors • Speed of movement • Size of blocks transported
Flooding by debris flow on alluvial fan			Buildings: Filled by mud, damage to contents Persons in buildings: None, persons are normally able to escape Infrastructure: Coverage Persons in traffic: None, persons are normally able to escape	<ul style="list-style-type: none"> • Volume of debris flow • Water & sediment content • Local topography of fan • Triggering factors • Distance from source • Distance from lahar channel • Speed
Impact by Sturzstrom			Buildings: Total collapse Persons in buildings: Loss of life Infrastructure: Total destruction Persons in traffic: Loss of life	<ul style="list-style-type: none"> • Volume of rockfall mass • Location of source zone • Distance to Elements at risk • Triggering factors • Local topography along track • Distance from source zone • Precursory events
Liquefaction			Buildings: Differential settlement, cracks Persons in buildings: Minor injuries or no-injuries Infrastructure: Differential settlement, cracks Persons in traffic: no-injuries	<ul style="list-style-type: none"> • Soil types • Soil strength • Grain size distribution • Foundation types • Earthquake intensity • Water table
Deep seated creep movement			Buildings: Differential settlement, tilting, cracks Persons in buildings: Minor injuries or no-injuries Infrastructure: Differential settlement, cracks, broken pipes Persons in traffic: no-injuries	<ul style="list-style-type: none"> • Speed of movement • Local geological situation • Age of landslide • Seasonality of movement

Figura 6. Diferents situacions en la que els elements de risc s'exposen als diferents tipus d'esllavissada. **Font:** (van Westen et al., 2006).

2.3.2.5. Consideració dels elements exposats segons tipus i escala d'esllavissada

En el cas de desprendiments rocosos, quan es tracta d'anàlisis a escales petites amb baixa resolució, es consideren com a elements exposats tots aquells que es troben al costat de parets i vessants escarpades. En canvi, en el cas d'escales locals o de llocs específics on es pot identificar la trajectòria dels blocs despresos, es prenen com a elements exposats aquells que queden situats en mig de les trajectòries calculades.

Tanmateix, cal tenir en compte que els blocs despresos es poden anar fragmentant al llarg del pendent traçant noves trajectòries, fet que pot acabar sent una amenaça per a una gran extensió del terreny. Conseqüentment, en molts casos s'ha de treballar amb escales grans, les quals requereixen informació detallada sobre la probabilitat espacial de que un bloc arribi a impactar contra un objecte. Llavors, en aquest cas, es determinen els elements exposats considerant les trajectòries més probables i avaluant-ne la probabilitat d'impacte.

Per al cas dels corrents d'arrossegalls, per altra banda, es calculen àrees senceres d'exposició en comptes d'elements individuals degut a que, per les seves característiques intrínseques, els seus efectes destructius abasten zones extenses. L'exposició espacial d'una àrea s'expressa com el rati entre l'àrea afectada i l'àrea total (Corominas et al., 2014).

Per últim, en el cas de les esllavissades lentes, els elements exposats són aquells que es troben dins de l'àrea que està lliscant, ja estiguin situats al costat o al damunt d'un escarpament, a sobre d'una àrea que s'està desplaçant o dins de les zones de descàrrega del material esllavissat.

Així doncs, el grau d'exposició dels elements vindrà definit per la cinemàtica del fenomen sempre i quan l'escala i la resolució de l'anàlisi ho permetin.

2.3.2.6. Vulnerabilitat dels elements exposats

Un altre dels factors de l'equació del risc és la vulnerabilitat, la qual es pot definir com el grau de pèrdua o dany d'un element o conjunt d'elements situats dins de l'àrea d'influència d'una esllavissada d'una donada magnitud o intensitat (AGS Sub-Committee, 2000; Corominas et al., 2014; Li et al., 2010; Papathoma-Köhle et al., 2011; Uzielli et al., 2015b).

La probabilitat d'impacte es pot calcular per elements exposats (principalment vehicles) que impacten sobre masses de terreny esllavissades o impactes directes de sòl o roca a objectes, la qual ve determinada per la freqüència i la mida d'aquests materials despresos, pel volum de la massa que impacta o per les característiques geomètriques del terreny esllavissat, entre d'altres, tot i que, normalment tot això es simplifica fent una hipòtesi de que tots els objectes compten amb la mateixa mida, i treballant amb distribucions uniformes temporals i espacials dels mateixos. Per avaluar-la s'apliquen diferents mètodes, els quals es determinen a partir del tipus d'esllavissada, el tipus d'element exposat i l'escala de l'anàlisi.

2.3.2.7. Classificació de la vulnerabilitat segons l'element exposat

Vulnerabilitat dels edificis

Aquest tipus de vulnerabilitat depèn de la intensitat, el mecanisme de propagació i la magnitud de l'esllavissada, i del tipus d'edifici estudiat pel qual es determinen característiques com la geometria, les propietats dels materials de construcció, l'estat del manteniment, els fonaments, el número de plantes, etc. I es pot expressar en termes de l'estat del dany, classificant-lo dins d'un rang que va des dels danys negligibles o estètics fins a la destrucció total de l'edifici.

D'aquesta manera, i segons quina sigui l'escala de l'anàlisi, es fan agrupacions d'edificis que presenten característiques similars com, per exemple, grups segons el tipus d'edifici, els materials de construcció, l'antiguitat, el número de plantes, entre d'altres, per així simplificar els estudis, com fan (Uzielli et al., 2015b), per exemple. Pel que fa als costos associats, aquests venen determinats pel seu tipus d'estructura, ubicació i ús.

Per altra banda, els factors del fenomen que afecten a la vulnerabilitat dels edificis són: la velocitat i el volum del terreny que impacta contra l'edifici o que es desplaça per sota d'aquest, i la part on impacta (no és el mateix que impacti contra una finestra o que caigui tot al damunt de la coberta). En la Figura 7 es pot veure com es poden veure afectats els edificis en funció del tipus de fenomen donat.

En escales amb molt de detall, i especialment per a desprendiments rocosos i corrents d'arrossegalls, s'ha d'afegir addicionalment el punt estructural exacte d'impacte sobre els elements d'estabilitat ja que no és el mateix que l'impacte es produeixi sobre un element no estructural com una porta o sobre un element estructural poc important o, per contra, que ho faci contra un pilar principal, o que colpegi un element el qual generi un efecte dominó que acabi causant el col·lapse total de l'edifici.

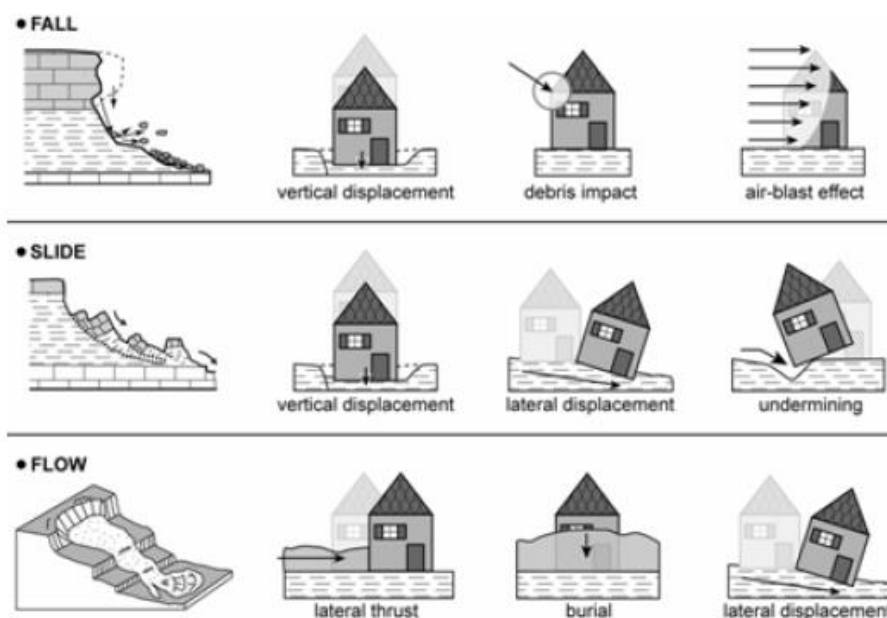


Figura 7. Diagrama on es descriuen gràficament com es poden veure afectats els edificis segons el tipus d'esllavissada que es doni. **Font:** (Malet & Maquaire, 2008).

A continuació es mostren imatges d'edificis que han patit diferents danys i on es veu com han quedat afectats depenent del fenomen, la magnitud i el punt d'impacte que els ha colpejat, a part de ser exemples reals de les situacions mostrades en la Figura 7.



Figura 8. Recull de fotografies on es veuen edificis afectats per esllavissades. Les fotografies A i B corresponen a dos edificis afectats per una esllavissada lenta. L'edifici A es troba situat just al damunt de la massa que s'està desplaçant i l'edifici B es troba just a sobre del punt on s'ha format una cicatriu de coronació (Mavrouli et al., 2014). En les fotografies C, D i E, en canvi, es veuen els danys provocats per una esllavissada donada a la població de Cavalerizzo, Italia, al març de 2005. En la fotografia C es veu una vista general del terreny que s'ha esllavissat, en la fotografia D apareix en detall el dany causat en un dels edificis, i en la fotografia E es poden observar els danys provocats en una de les carreteres de la població i en els edificis del voltant d'aquesta (Petrucchi & Gullà, 2010).



Figura 9. Recull de fotografies on es fa una comparativa de l'estat de dos edificis l'any 2005 i l'any 2011. Aquests edificis es troben afectats per una esllavissada lenta situada sota la població de Lungro, Itàlia. L'edifici A es troba al límit del pendent que s'està esllavissant i la comparació està feta amb una imatge del juny del 2005 i amb una altra, des del mateix punt d'observació, a l'abril de 2011. L'edifici B, en canvi, està situat al damunt de la massa que s'està movent i les imatges corresponen al febrer de 2005 i a l'abril de 2011, respectivament. **Font:** (Antronico et al., 2015).

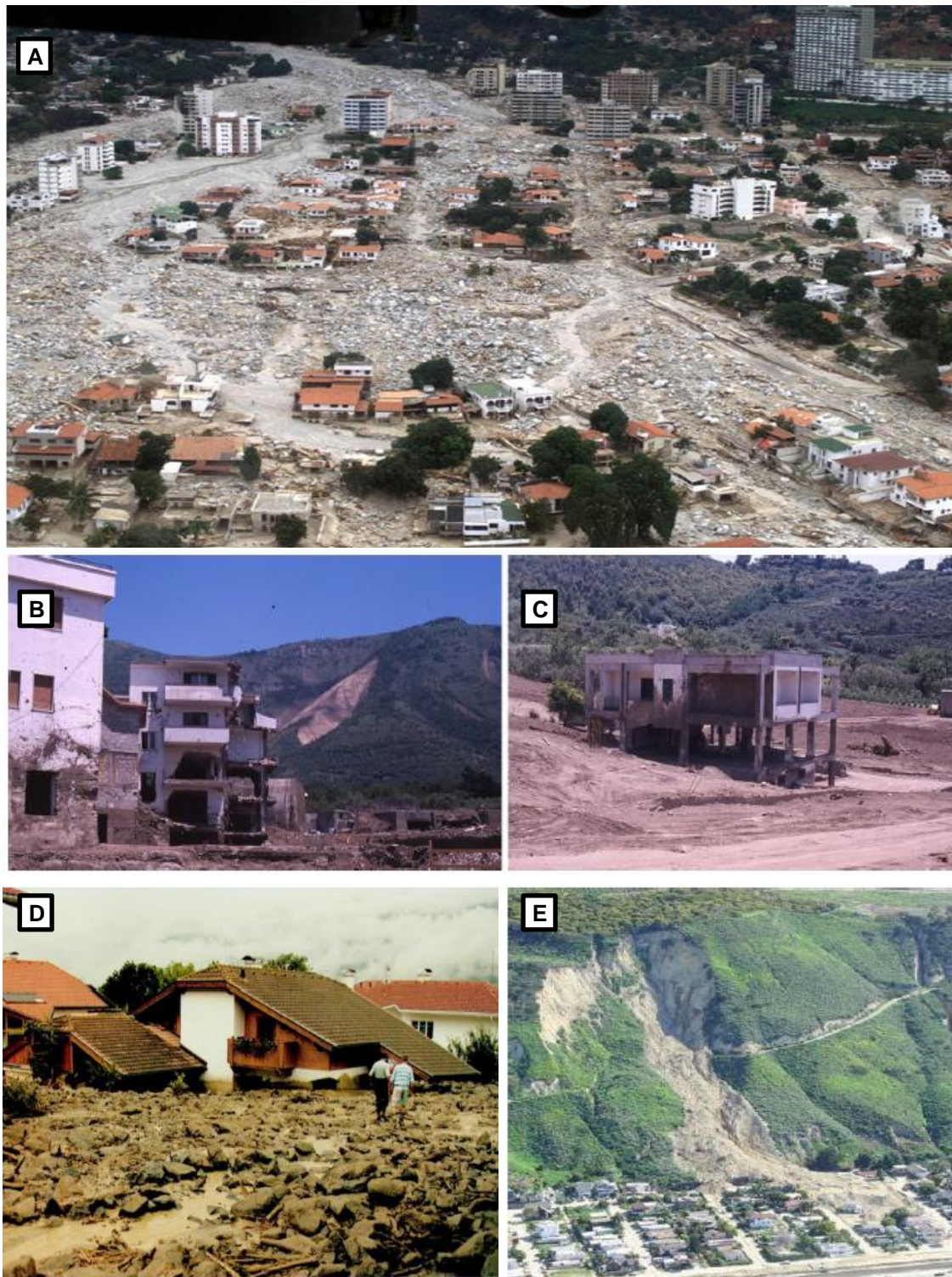


Figura 10. Recull de fotografies de poblacions i edificis afectats per corrents d'arrossegalls. La fotografia A correspon al corrent d'arrossegalls de Carabella, Venezuela, al 1999 (Jakob et al., 2012). Les imatges B i C mostren els danys provocats en dos edificis de Campania, Itàlia, en un esdeveniment donat al 1998 (Mavrouli et al., 2014). La imatge D correspon al corrent d'arrossegalls donat a la comunitat Austríaca de Nussdorf-Debant al 1997 (Fuchs et al., 2007). Per últim, en la fotografia E es veu com va afectar un corrent d'arrossegalls/colada de terres a la comunitat de La Conchita, California, al 2005 (Llorens & Masquef, 2009).

Vulnerabilitat de les infraestructures

Les esllavissades també poden afectar a carreteres, vies de tren, canalitzacions, cablejat elèctric, etc. En el cas de carreteres i línies de tren, la vulnerabilitat ve donada en consideració de si les vies queden bloquejades parcial o totalment per l'esllavissada juntament amb el dany estructural associat, a part de considerar també el volum de trànsit i el tipus i l'amplada de la via.

La probabilitat de que les esllavissades alhora afectin a vehicles o trens que circulen per les vies en aquell precís moment es presenten en el punt següent.

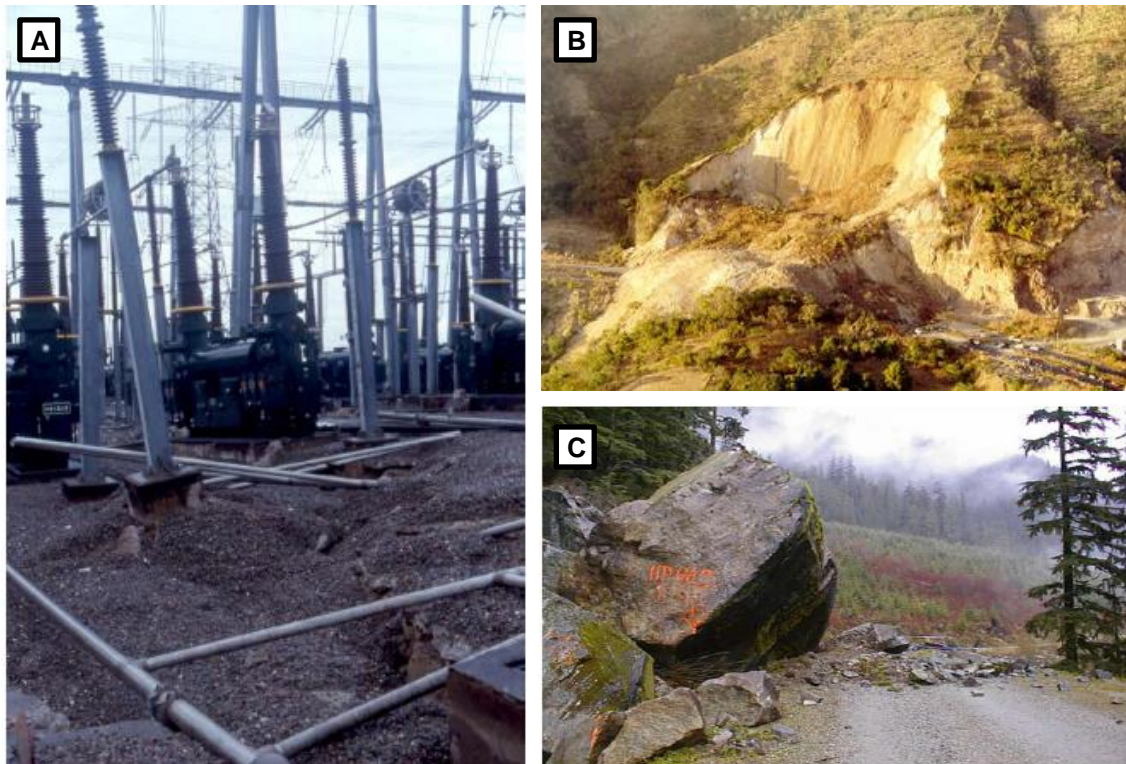


Figura 11. Fotografies que mostren diferents infraestructures afectades per esllavissades. En la imatge A apareix una central elèctrica de Chi-Chi, Taiwan, la qual es va veure afectada per un sisme induït per una esllavissada propera a la central, l'any 1999. S'observa com el terreny es veu remogut, les cimentacions dels suports estan descalçats i hi ha part de l'estructura elèctrica pel terra. En la imatge B es veu un vessant esllavissat a sobre d'una carretera. Es desconeix a on i quan va succeir l'esdeveniment (Pitilakis, 2008). Per últim, en la fotografia C s'observa un bloc de roca després el qual, segons els autors, ha afectat a una canonada al caure-hi al damunt (Wang & Cavers, 2008).

Vulnerabilitat dels vehicles

Pel que fa als vehicles, la vulnerabilitat es determina segons el tipus, la posició relativa respecte al terreny esllavissat i l'àrea d'impacte (si colpeja el vehicle parcial o totalment). A part, també es té en compte si són els vehicles els que impacten sobre un volum de terra esllavissat, si pateixen danys degut al mal estat de la via després de veure's involucrada en un esdeveniment, o si l'esllavissada els hi cau al damunt.

Segons (Pantelidis, 2011) són més freqüents els accidents provocats per cotxes que topen contra masses de terreny esllavissat que el provocats per masses de terra o roca que impacten contra els cotxes que circulen per la via (Nicolet et al., 2015).

En el cas dels vehicles estàtics, la probabilitat temporal i espacial de que una part de terreny esllavissat l'impacti és proporcional a la longitud del tram de carretera que ocupa aquest vehicle.

Pel que fa als vehicles en moviment, com poden ser automòbils o trens, històricament s'ha treballat en els casos on els accidents s'han ocasionat a partir de despreniments rocosos. El que han fet els autors (Bunce et al., 1997; Fell et al., 2005; Ferlisi et al., 2012; Macciotta et al., 2016; Mignelli et al., 2012; Wang et al., 2014) per a calcular la probabilitat espacial-temporal de que un vehicle intercepti la trajectòria d'un bloc després just quan aquest arriba a la via de circulació, ha sigut aplicar la següent fórmula (Nicolet et al., 2015):

$$P_{ST} = \frac{f_V \times L_V}{v_V} \quad [6]$$

On P_{ST} representa la probabilitat espacial-temporal de que un bloc després topi contra un vehicle, f_V és la densitat de transit expressada com el número de vehicles per unitat de temps (per exemple, (Ferlisi et al., 2012), agafa el transit mitjà de la via per dia (vehicles/dia)), L_V és la longitud del vehicle en qüestió i v_V és la velocitat a la que circula el vehicle.

Una fórmula pràcticament igual presenten (Macciotta et al., 2016) en el cas de que un bloc després colpegi un tren:

$$P[S] = \frac{(L \times T)}{(V \times 24)} \quad [7]$$

On $P[S]$ és la probabilitat espacial de que el material després coincideixi amb un dels trens en circulació, L és la longitud mitjana del tren en km, T és el número de trens que circulen per la via al dia i V és la velocitat del tren en km/h.

En aquest cas doncs, el qual és el més aplicat, només es té en compte la freqüència de vehicles, la longitud dels mateixos i la seva velocitat, negligint la longitud de la porció de la via afectada pel fenomen.

No obstant, hi ha casos en els que en comptes de considerar les dimensions del vehicle, tal i com s'ha fet en el cas anterior, es treballa considerant la dimensió de l'esdeveniment (com ho fan a Suïssa) o es fa aplicant el mètode *Average Vehicle Risk* (AVR) utilitzat en el Rockfall Hazard Rating System (RHRS) (Nicolet et al., 2015).

En el primer cas, es treballa preparant tres possibles escenaris amb tres períodes de retorn diferents (30, 100 i 300 anys respectivament) i s'apliquen les formules següents:

$$P_{ST} = P_{ST}^* \times P_S = \frac{f_V \times W_E}{v_V} \quad [8]$$

$$P_{ST}^* = \frac{f_V \times L_H}{v_V} \quad [9]$$

$$P_S = \frac{W_E}{L_H} \quad [10]$$

On P_{ST} és la probabilitat espacial-temporal de que part del terreny després impacti sobre un vehicle, P_{ST}^* és la probabilitat espacial-temporal de l'escenari, f_V és la freqüència de vehicles, W_E representa l'amplada del tram de via afectat per l'esllavissada, v_V la velocitat del vehicle i L_H el tram de via inclòs dins el mapa d'intensitat de l'escenari estudiat.

En el segon cas, el que es fa és aplicar la formula següent, la qual ni considera les dimensions del vehicle ni les del fenomen (Nicolet et al., 2015):

$$P_{ST} = \frac{f_V \times L_H}{v_V} \quad [11]$$

On P_{ST} és la probabilitat espacial-temporal de que part del terreny després impacti sobre un vehicle, f_V és la freqüència de vehicles, L_H representa la longitud de la secció perillosa i v_V la velocitat a la que circula el vehicle.

Aquests mètodes, però, tot i ser bastant utilitzats tenen l'inconvenient de que els resultats poden tenir un error significatiu degut al fet de negligir la mida dels vehicles o de l'esdeveniment. És per això que hi ha qui segueix un altre mètode, el qual té en compte tots aquests factors.

Segons (Nicolet et al., 2015), diferents autors utilitzen la següent fórmula, considerant tant la longitud del vehicle (L_V) com l'amplada del tram de via afectat (W_E), per tal de disminuir l'error comentat anteriorment a l'hora de calcular la probabilitat d'impacte al lateral d'un vehicle:

$$P_{ST} = \frac{f_V \times (W_E + L_V)}{v_V} \quad [12]$$

On P_{ST} és la probabilitat espacial-temporal de que part del terreny després impacti sobre un vehicle, f_V és la freqüència de vehicles i v_V la velocitat a la que circula el vehicle.

No obstant, aquesta equació també presenta un error en el seu resultat quan es tracta de situacions on l'esdeveniment traça diferents trajectòries. En aquests casos, la longitud del vehicle (L_V) s'hauria de sumar a l'amplada de cada tram afectat per cada trajectòria (W_{E1} i W_{E2}, \dots, W_{En}) però la formula només contempla la longitud total (W_E), la qual és la suma de cada longitud de tram involucrat tal i com s'indica en la figura següent (Nicolet et al., 2015):

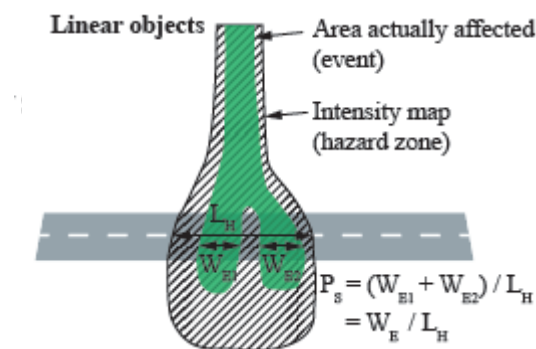


Figura 12. Càlcul de la probabilitat espacial-temporal de que una porció de terreny impacti sobre un vehicle quan es tracta d'un esdeveniment amb més d'una trajectòria. **Font:** (Nicolet et al., 2015).

Per últim, hi ha un mètode per calcular la probabilitat que el material esllavissat impacti tant contra el lateral del cotxe com contra la part frontal. Aquest mètode el va presentar (Roberds, 2005) i és el més complex de tots. Es basa en calcular la probabilitat que el terreny esllavissat passi entre vehicles uniformement separats (Nicolet et al., 2015):

$$P_{ST} = 1 - \frac{\left[L_S - (L_E + W_V) \frac{v_V}{v_E} \right] - W_E}{L_S + L_V} \quad [13]$$

On P_{ST} és la probabilitat espacial-temporal que el terreny esllavissat passi entre vehicles uniformement espaiats, L_V , W_V i v_V són la longitud, l'amplada i la velocitat del vehicle respectivament, L_E , W_E , v_E són la longitud (distància en perpendicular a la longitud del vehicle), l'amplada i la velocitat de la porció de massa que s'esllavissa respectivament, i L_S és la distància que hi ha entre els vehicles, la qual depèn de la densitat de trànsit de la via en el moment de l'esdeveniment.

Tots aquests paràmetres es veuen representats de la següent manera:

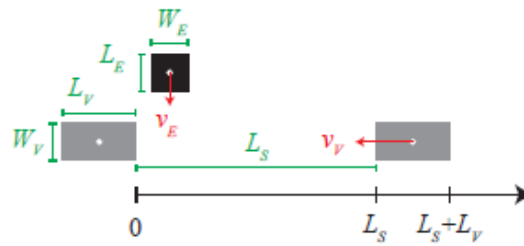


Figura 13. Diagrama on es mostra la situació calculada amb l'Equació [13]. Els blocs grisos representen els cotxes i el bloc negre la porció de terreny que s'està desplaçant. **Font:** (Nicolet et al., 2015).

Per tant, l'avantatge que presenta aquest mètode és que té en compte la circumstància de que els accidents es poden donar perquè la massa esllavissada topi amb la part frontal del vehicle. Per contra, presenta la limitació de que es calculi considerant un espaiat uniforme dels vehicles, quan la probabilitat d'impacte és més alta quan no és així d'uniforme, a part de que els paràmetres involucrats a vegades són difícils d'obtenir.

Per últim, s'ha trobat que la probabilitat de que més d'un vehicle es vegi involucrat en múltiples esdeveniments ve donada per la següent equació (AGS Sub-Committee, 2000):

$$P_{(S)} = 1 - (1 - (P_{(S:H)}))^{N_r} \quad [14]$$

$$P_{(S:H)} = \frac{N_V}{24} \times \frac{L}{1000} / V_V \quad [15]$$

On $P_{(S)}$ és la probabilitat de que un o més vehicles es vegin colpejats per un bloc després, $P_{(S:H)}$ és la probabilitat de que un vehicle estigui ocupant la part de la carretera afectada per l'esllavissada, N_r és el nombre d'esdeveniments produïts per dia, N_V és el número de vehicles per dia, L és la longitud del vehicle en metres i V_V és la velocitat del vehicle en km/h.

Vulnerabilitat de persones

Per últim, la vulnerabilitat física de les persones ve definida pel tipus, la intensitat i la magnitud de l'esllavissada, i la capacitat de resistència o mobilitat i la posició relativa dels individus involucrats en l'esllavissada.

Tot i això, cal apuntar que també variarà en funció de si es tracta d'una esllavissada de tipus lent o ràpid (en el primer cas la vulnerabilitat de les persones es pot negligir degut a que aquestes poden escapar o fins i tot no notar que el terreny s'està movent, i en canvi en el segon cas succeeix justament el contrari), i de l'època de l'any en la que es produeixi (en estacions d'esquí i zones de muntanya la vulnerabilitat augmentarà durant els mesos d'hivern, i el mateix passarà a l'estiu en les zones costaneres).

Les persones normalment són interceptades per esllavissades mentre es troben ocupant edificis i vehicles. És per això que la probabilitat temporal i espacial d'impacte normalment es calcula en funció del grau d'exposició de l'edifici o del vehicle on hi està situada la persona en concret, juntament amb el percentatge d'espai que ocupa.

En el cas de les persones que es troben "estàtiques" dins dels edificis, quan hi ha manca de dades en el cens, generalment es calcula mitjançant un mapa de la empremta dels edificis i els respectius usos del sòl ja que així es pot determinar un número aproximat de la gent que hi ha a l'interior de cada un dels edificis estudiats. Aquest mètode és bastant encertat per a zones residencials però en canvi no és tan apropiat quan es tracta d'edificis com escoles, hospitals, centres comercials, etc. Llavors, el que es fa per aproximar millor aquest valor de població estàtica és comptar també amb la superfície útil de cada edifici de manera que, finalment, s'acaba obtenint un valor prou acurat a partir de multiplicar el valor mitjà de persones per superfície útil de cada edifici (persones/m²) per la superfície total de l'edifici en qüestió (m²) (Van Westen, 2009).

No obstant, a part de la gent estàtica que roman dins dels edificis, també hi ha la gent que surt a l'exterior ja sigui per desplaçar-se, per fer turisme, per comprar, etc. I, a l'igual que és possible calcular aproximadament el número de persones que hi ha dins de cada habitatge, també és possible calcular la probabilitat d'impacte de persones que no estan a dins d'algun altre element exposat. En aquest cas, el que es fa (sobretot quan hi ha manca de dades en el cens de dinàmica) és calcular-la a partir de l'ús del sòl i la franja horària tant del dia com de la nit (Van Westen, 2009).

2.3.2.8. Quantificació de la vulnerabilitat

Per a quantificar la vulnerabilitat dels elements de risc es poden utilitzar corbes de fragilitat, corbes de vulnerabilitat o índexs de vulnerabilitat, els quals indiquen el grau de l'estat del dany en una escala que va del 0 al 1, on el 0 indica que no hi ha cap desperfecte i el 1 expressa destrucció (Corominas et al., 2014). Aquest sistema ha sigut el menys aplicat al llarg de la història, tot i que en els darrers anys s'ha començat a utilitzar més (Papathoma-Köhle, 2016).

Les corbes de fragilitat s'utilitzen per calcular la probabilitat de que un edifici sigui damnificat en funció de la intensitat del fenomen (Papathoma-Köhle, 2016).

No obstant, l'eina més utilitzada per avaluar la vulnerabilitat és la corba de vulnerabilitat. Les corbes de vulnerabilitat es basen en la intensitat del fenomen i el conseqüent dany provocat, sovint deixant de banda les característiques dels edificis, sobretot quan l'esdeveniment estudiat afecta només a un nombre concret de construccions (Papathoma-Köhle, 2016).

Aquestes corbes es van començar a aplicar dins el camp dels terratrèmols, i en els últims anys s'han anat estudiant per adaptar-les, i finalment establir-les, en l'àmbit de les esclavissades. A part, també s'utilitzen en casos d'inundacions i temporals de forts vents.

El que fan aquestes corbes, és expressar en un sol diagrama la probabilitat de que es sobrepassi un cert grau de dany, per a un rang de valors donat pels paràmetres d'intensitat de les esclavissades (Mavrouli et al., 2014).

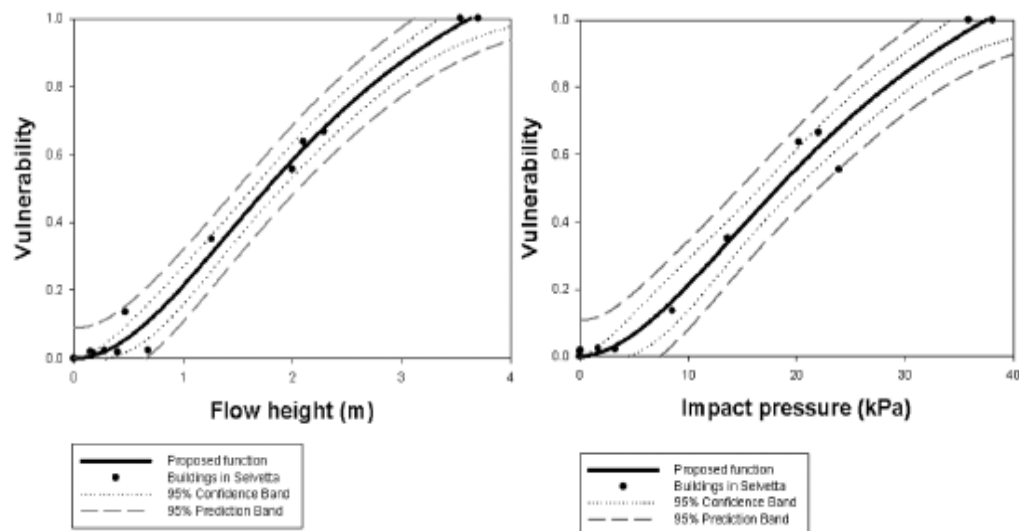


Figura 14. Corbes de vulnerabilitat. A l'esquerra donada per les alçades del flux i a la dreta donada per les pressions d'impacte del flux. **Font:** (Quan Luna et al., 2011).

Mètodes

Existeixen tres mètodes diferents per fer una quantificació de la vulnerabilitat: heurístic, empíric i analític. Els dos principals factors que determinen el tipus de mètode a utilitzar són l'escala i l'extensió de la zona d'estudi, a part, de l'existència i la qualitat de les dades d'entrada que també són aspectes a tenir en compte.

En estudis d'escala nacional o regional on les dades d'entrada tenen poc detall i, per tant, només es pot fer una quantificació aproximada de la vulnerabilitat, el mètode més utilitzat és l'heurístic. Tanmateix, en estudis fets a escala regional o local tant s'hi aplica el mètode heurístic com l'empíric. La decisió de treballar amb un o altre ve determinada per la qualitat de les dades d'entrada. Per últim, en escales de zones específiques s'agafa el mètode empíric o, en cas de requerir-se un estudi d'un nivell alt de precisió on a més l'adquisició de les dades d'entrada sigui factible, s'utilitza l'analític.

- **Mètodes heurístics.** Quantifiquen la vulnerabilitat de manera aproximada ja que els valors de vulnerabilitat són avaluats a partir del criteri i la experiència dels experts que l'estudien. Exemples d'aquests mètodes són els mostrats en (Bell & Glade, 2004), els quals atribueixen valors de vulnerabilitat fixes a les persones, als edificis i a les infraestructures que es troben dins d'una àrea exposada en funció dels períodes de retorn de corrents d'arrossegalls i de despreniments rocosos, basant-se en el seu valor econòmic. O, (Winter et al., 2013) els quals exposen una metodologia per danys materials en carreteres provocats per corrents d'arrossegalls basada en qüestionaris i anàlisis estadístics per acabar calculant corbes de fragilitat (Corominas et al., 2014).

- Mètodes empírics. Aquesta tipologia és la més utilitzada ja que és la més senzilla i, a la vegada, la més fiable degut a que calcula la vulnerabilitat a partir de la intensitat del fenomen. Tanmateix, presenta l'inconvenient de que necessita dades d'esdeveniments anteriors, les quals a vegades són inexistents o incompletes. (Fuchs et al., 2007), per exemple, a partir d'un corrent d'arrossegalls que va tenir lloc a la comunitat austríaca de Nussdorf-Debant l'any 1997, el qual va estar molt ben documentat, van derivar una funció empírica de la vulnerabilitat per tal de relacionar les intensitats de l'esdeveniment amb els valors de vulnerabilitat dels elements exposats (en aquest cas edificis de maçoneria i estructura de formigó). Això va portar a utilitzar aquesta funció com un indicador de la resistència estructural dels edificis enfront als impactes dels corrents d'arrossegalls. Un altre exemple és el de (Quan Luna et al., 2011), els quals van agafar l'esdeveniment donat a Selvetta, Itàlia, l'any 2008, i van derivar corbes de vulnerabilitat de manera que es relacionaven les dades de sortida dels models numèrics dinàmics del fenomen (alçades del flux i pressions d'impacte), amb el valor econòmic dels danys provocats als elements exposats (que en aquest altre cas també eren edificis de maçoneria i formigó). Llavors, la vulnerabilitat va quedar definida com el rati entre el valor de les pèrdues i el valor de la reconstrucció dels edificis afectats per l'esdeveniment.
- Mètodes analítics. En aquest últim cas s'utilitzen models analítics per a l'obtenció de corbes de fragilitat. Solen ser aplicables a qualsevol tipus de sòl, geometria de vessant, tipologia d'edificis, etc., però tot i això, són poc freqüents degut a la seva complexitat i a la falta de dades d'entrada d'alta definició. En aquest cas, (Mavrouli & Corominas, 2010), per exemple, van proposar un mètode per estudiar la resposta dels edificis davant d'impactes donats per blocs despresos. La hipòtesi realitzada constava de que l'edifici tenia dues plantes i estava construït amb formigó armat, i que l'impacte el provocava un sol bloc de roca de 2 metres de diàmetre que es desplaçava a una velocitat de 3.5 m/s, el qual topava contra les columnes del soterrani. Els resultats van demostrar la importància del punt estructural d'impacte del bloc ja que, si l'energia cinètica de l'impacte és suficient per malmetre una columna, el dany és local i reparable mentre que si l'energia és tal que acaba malmetent més d'una columna, llavors els danys són més greus i només es poden arreglar portant a terme una reconstrucció de l'edifici afectat. La conclusió a la que es va arribar va ser que la quantificació de la vulnerabilitat d'un edifici davant d'un desprendiment rocós va en funció de la probabilitat d'ocurrència de l'impacte pel bloc després i l'índex de danys resultants.

2.3.2.9. Cost econòmic dels elements exposats

En molts estudis es fa una diferenciació entre costos directes i indirectes que, tal i com indiquen els seus noms, els directes són aquells que van associats a les accions pertinents per reparar els danys causats per l'esdeveniment, i els indirectes són els que apareixen com a efecte secundari de l'esllavissada, com poden ser la pèrdua de valor econòmic dels immobles pròxims a les zones afectades o les accions per solucionar problemes ambientals com la potabilització de l'aigua en zones afectades per esllavissades, entre d'altres.

Tanmateix, també hi ha qui fa una classificació molt més minuciosa dels costos (Antronico et al., 2015):

- Costos directes o costos tangibles directes: els que afecten a les reparacions, als manteniments o als reemplaçaments de béns i serveis.
- Costos indirectes o costos tangibles indirectes: Exemple d'aquests serien la pèrdua de valor dels immobles o la pèrdua de productivitat, entre d'altres.
- Costos intangibles: són de caràcter més subjectiu, ja que no es generen a partir de dades comptables com són el preu dels materials o el número d'hores de reparació. Dins d'aquest grup, llavors, entrarien tots aquells costos associats a l'estrès i a la pèrdua de qualitat de vida de les persones que han patit els efectes d'una esllavissada.

Els costos dels danys provocats a edificis varien en funció del tipus d'estructura, de la seva ubicació i del seu ús (Corominas et al., 2014). Per calcular-los, normalment s'apliquen els costos estàndard de construcció que assignen associacions, col·legis o òrgans administratius d'enginyers i arquitectes, els quals es solen mesurar en €/m². Un exemple d'això es mostra en (Quan Luna et al., 2014).

Finalment, també es fan anàlisis de cost-benefici, els qual es creen per determinar la necessitat, l'escala i el cost de les mesures de mitigació del risc (Jakob et al., 2012). Així doncs, aquests anàlisis proporcionen la base per a l'establiment de prioritats en la gestió del risc i de les mesures de mitigació i de l'assignació dels recursos associats (Corominas et al., 2014).

2.3.3. Aplicació de la formula del risc: Mapes de zonació

Com a resultat de l'equació [2], la qual s'ha presentat a l'apartat 2.3.1, es troben els mapes de zonació. En aquests mapes s'hi representen els diferents valors de pèrdues esperables trobats en una àrea estudiada, de manera que és una eina per conèixer de forma visual el rang de valors del risc que presenta una àrea exposada a una o a més d'una esllavissada.

Aquests mapes, doncs, es creen amb la finalitat d'informar, advertir, assessorar i ajudar en el disseny de mesures preventives i de mitigació, dins l'àrea de la gestió del risc.

Per altra banda, degut al gran abast d'aquests mapes (tant són consultats per propietaris de terrenys, com per ocupants, afectats, autoritats reguladores, consultors, professionals geotècnics o analistes del risc, entre d'altres) és important determinar l'escala correcta en cada cas per tal de que aquests mapes realitzin correctament la seva funció. És per això que a continuació s'exposa cadascuna d'elles.

Per últim, abans de passar a la descripció de les diferents escales de mapes, està bé apuntar que aquests existeixen també per a la zonació de la susceptibilitat, i per al perill d'esllavissada.

2.3.3.1. Classificació de les escales de mapes de zonació

Escala de detall (>1:5.000)

Els mapes amb aquesta escala són els que presenten un nivell de detall més alt ja que treballen amb àrees que arriben fins a les desenes de km². Per tant, són mapes que donen servei a l'hora d'analitzar el terreny abans de la fase de disseny dels treballs de control.

Escala Local (1:25.000 – 1:5.000)

Amb aquesta escala una mica més ampliada, la qual inclou àrees que van des de les desenes de km² als milers de km², el grau de resolució del mapa és suficientment elevat com per poder realitzar anàlisis d'estabilitat de talussos en àrees relativament grans. És per això, que aquests mapes solen ser consultats per les administracions a l'hora de fer, per exemple, planificacions i implantacions de desenvolupament urbà i de sistemes d'emergència i d'avions d'alerta a nivell local, a part de fer servei als mateixos usuaris del terreny.

A més, aquesta escala és necessària per fer una classificació de les àrees amb més risc, donant prioritat així a aquelles que requereixen d'obres de mitigació per tal de fer-les segures.

Escala Regional (1:250.000 – 1:25.000)

En aquest altre tipus, l'àrea d'aplicació es redueix a regions que poden anar des del miler de km² fins a les desenes de milers de km² pel que, en general, són utilitzats per a la planificació d'activitats en primeres fases de projectes de desenvolupament regional, per a enginyers que hagin de realitzar estudis de les limitacions degudes a la inestabilitat en el desenvolupament de grans projectes d'enginyeria i plans de desenvolupament regional, o per preparar plans urbans d'emergència a nivell regional, entre d'altres.

Escala Nacional (<1:250.000)

Finalment, es troben els que mostren menys detall. Aquests es creen per donar una visió generalitzada de les àrees susceptibles a esllavissades de països sencers. Per tant, normalment són consultats per responsables de la seguretat pública i usuaris de tot tipus amb l'objectiu d'informar-se. En aquesta escala no queden contemplades les intensitats de les esllavissades.

No obstant això, cal tenir en compte que els mapes a escala nacional (i regional) no poden mostrar col·lapses petits de vessants, ni es poden obtenir anàlisis de propagació ni de intensitat-freqüència. És per això que, en aquests casos, els elements i/o les zones de risc s'acaben identificant i quantificant mitjançant la creació d'unitats amb elements que presenten característiques similars.

2.3.3.2. Avaluació dels mapes de zonació

Per tal d'aprovar la fiabilitat dels mapes de zonació, la millor manera de fer-ho seria deixant passar el temps i veure si sobre el terreny acaba passant el que s'indica en ells però, com que a la pràctica això no és viable, el que teòricament es pot fer és avaluar algunes característiques com les que s'exposen a continuació (Corominas et al., 2014):

- Incerteses. Que poden ser:
 - Aleatòries: si són intrínseques del fenomen en sí.
 - Epistèmiques: si venen donades per falta de coneixement o de dades.
- Robustesa. És la que afecta el canvi en la precisió de la caracterització del que s'està representant en el mapa (que pot ser el grau de risc, de susceptibilitat o de perill, tal i com s'ha apuntat anteriorment), degut a possibles alteracions produïdes durant el procés de modelització.
- Sensibilitat. Fent un anàlisi de la sensibilitat s'identifiquen els paràmetres clau d'incertesa que més acaben influint en les incerteses finals dels mapes.

A la pràctica, però, es solen fer comparacions entre inventaris inicials i inventaris posteriors, o entre mapes d'una mateixa àrea realitzats per experts diferents per tal d'avaluar-los, encara que aquests mètodes no tenen en compte els costos que comporten la classificació errònia de la zona analitzada.

Aquest error en la classificació pot ser de dos tipus:

- Error I – Fals positiu. Representa els costos donats per unitats d'àrea no involucrades per cap fenomen d'esllavissada que són classificades erròniament com a perilloses o susceptibles.
- Error II – Fals negatiu. Defineix just el cas contrari, els costos donats per zones que poden ser afectades per una esllavissada, però en canvi són classificades erròniament com a estables i segures.

Els mètodes que s'han establert per fer una avaluació d'aquests mapes són els següents:

Estadístiques d'exactitud dependents del punt de tall

Amb aquest mètode s'analitza l'eficiència del mapa de zonació mesurant el percentatge de concordança entre el que es mostra en el mapa i el que s'observa a la realitat. El resultat és una classificació d'unitats estables i inestables del terreny estudiat (les estables presenten una susceptibilitat menor a la del punt de tall i les inestables una susceptibilitat major).

Estadístiques d'exactitud independents del punt de tall

En aquest cas, les tècniques més utilitzades per comprovar la qualitat del mapa de zonació són les corbes SR (Success-Rate) (Figura 15), les corbes ROC (Receiver Operating Characteristic) (Figura 17) i les corbes de costos (Figura 20).

Les corbes SR mesuren l'habilitat del model amb el que es fan els mapes de zonació per classificar correctament les unitats estables i inestables cartografiades. La corba es dibuixa en funció del percentatge acumulat d'àrea esllavissada amb una classe de susceptibilitat (abscissa) i el percentatge acumulat de l'àrea d'estudi amb la mateixa classe de susceptibilitat (ordenada). Un mapa, doncs, serà més fiable quan més vertical sigui la corba SR (corba blava de la Figura 15). A part, també es pot calcular el poder de predicció del model que fa el mapa de zonació mitjançant la corba de taxa de predicció (corba rosa de la Figura 15) (Mezughhi et al., 2011; Van Den Eeckhaut et al., 2009).

Tal i com es veu en la següent figura, els resultats de les dues corbes es mostren com a conjunts de dades de calibratge, que serien les esllavissades més antigues (corba blava de la Figura 15) i conjunts de dades de validació, que són les esllavissades més noves (corba rosa de la Figura 15) (Van Den Eeckhaut et al., 2009).

Mirant el gràfic, concretament la corba de taxa de predicció, es pot observar que, per exemple, aproximadament el 90% de l'àrea afectada per esllavissades recents es pot explicar només amb el 20% de l'àrea més susceptible (Van Den Eeckhaut et al., 2009).

En el cas de les corbes ROC, aquestes indiquen la qualitat del model que fa el mapa tant per la posició de la corba dins el gràfic com pel valor de l'àrea situada sota la corba (identificat com AUC), tal i com es mostra la Figura 17.

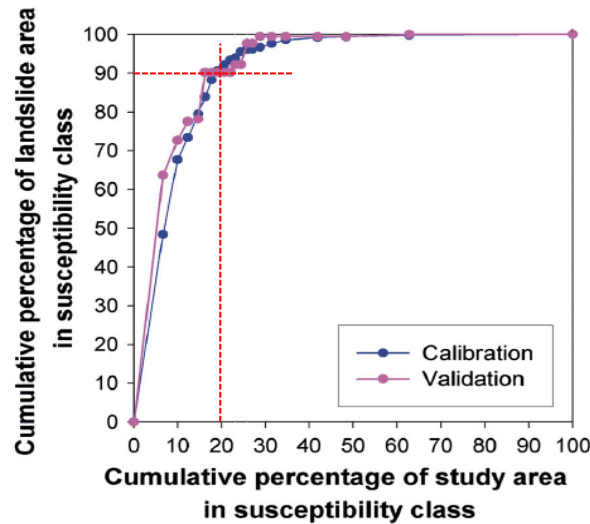


Figura 15. Exemple d'una corba SR. **Font:** (Corominas et al., 2014)

En el cas de l'exemple, l'AUC resultant té un valor de 0.92, el qual és elevat. Aquest resultat, juntament amb la situació de la corba en la part superior esquerra, indica que el model utilitzat per fer el mapa en aquest cas és bo.

Aquestes corbes treballen amb errors, els quals formen els eixos del gràfic. Aquests errors poden ser de quatre tipus diferents: fals positiu (false positive, fp), que forma l'eix de les abscisses, i fals negatiu que ja s'han descrit anteriorment, vertader positiu (true positive, tp), el qual es posa en l'eix de les ordenades, que és quan es classifica una àrea afectada per una esllavissada com a àrea inestable, i vertader negatiu que és quan correctament es classifica una àrea sense esllavissada com una àrea que no presenta inestabilitat.

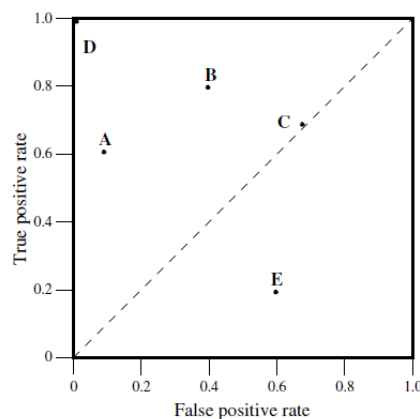


Figura 16. Exemple d'un gràfic ROC bàsic. **Font:** (Fawcett, 2006).

Analíticament, el tp i el fp es calculen de la manera següent (Fawcett, 2006):

$$tp \approx \frac{\text{Positius classificats correctament}}{\text{Total positius}} \quad [16]$$

$$fp \approx \frac{\text{Negatius classificats incorrectament}}{\text{Total negatius}} \quad [17]$$

Aquests dos termes, tp i fp, també s'associen a la sensibilitat i a la especificitat del model aplicat per fer el mapa de zonació, tal i com s'indica en la Figura 17.

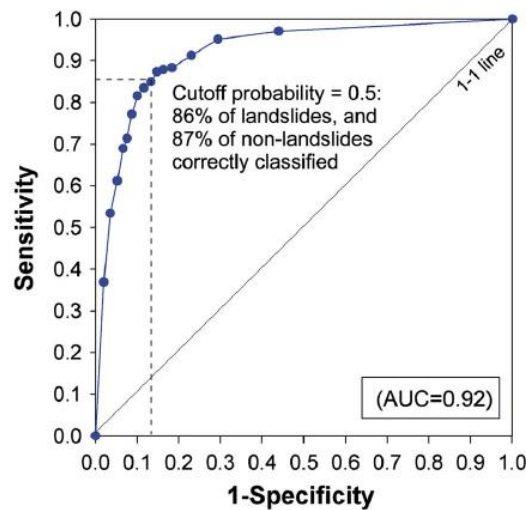


Figura 17. Exemple d'una corba ROC. **Font:** (Corominas et al., 2014).

Per tant, la coordenada (0,1) representa la classificació perfecta de l'àrea estudiada mentre que la coordenada (1,0) representa tot el contrari. És per això, que es considera un bon model aquell que presenta una corba a la part superior esquerra del gràfic.

Finalment, existeixen les corbes de cost. (Drummond & Holte, 2000), van proposar una alternativa a les corbes ROC que permetia representar explícitament el cost esperat d'un mètode (en el nostre cas un per crear mapes de zonació). Aquestes corbes representen el cost esperat normalitzat en funció d'una funció probabilitat-cost ($PC(+)$). A més, permeten veure immediatament el rang de costos i quant de millor és un mètode utilitzat respecte a un altre.

El cost, doncs, és normalitzat pel màxim cost esperat, el qual es donaria en el cas en que totes les situacions estiguessin mal classificades, és a dir, quan tant el fp com el fn fossin 1. El cost màxim normalitzat és 1 i el mínim és 0 (Corominas et al., 2014).

A la Figura 18 es mostren dos gràfics amb els quals es veu com es relacionen els dos tipus de corbes.

En l'exemple de les corbes ROC, es pot veure que el model representat per la corba discontinua és millor que el representat per la línia contínua però per saber com és de millor quantitativament és millor fer el canvi a corbes de cost.

Segons les dades de (Drummond & Holte, 2000), la diferència màxima entre els dos mètodes és d'aproximadament un 20%, la qual es dona quan la $PC(+)$ és 0.3 i 0.7, mentre que la diferència en la bona execució dels dos mètodes és negligible quan la $PC(+)$ va del 0 al 0.2 aprox., quan està a prop del 0.5 i quan va del 0.8 fins al 1, ja que les dues corbes de cost coincideixen en aquests punts. Per tant, la diferència entre els dos models és la distància vertical que hi ha entre les dues corbes.

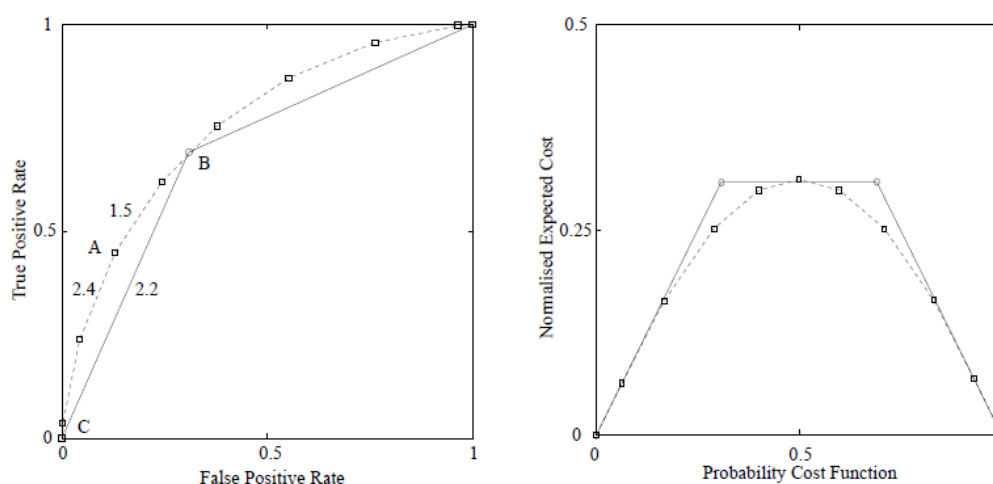


Figura 18. Exemple de dues corbes ROC al gràfic de l'esquerra i exemple de dues corbes de cost al gràfic de la dreta. La corba ROC discontinua correspon a la corba de cost discontinua, i el mateix passa amb les corbes contínues. **Font:** (Drummond & Holte, 2000).

Tanmateix, a l'igual que en el cas de les corbes ROC es pot veure amb un simple cop d'ull que el mètode representat amb la corba situada més cap a la part superior esquerra és el més acurat, el mateix passa amb les corbes de cost. En aquest cas, el mètode més eficient serà el que els seus classificadors tracin una corba situada a prop de l'eix de les abscisses. El motiu es presenta a continuació.

Un punt (tp , fp), el qual representa un classificador en l'espai ROC, es converteix en una línia en el espai cost mitjançant l'equació següent:

$$NE[C] = (1 - tp - fp) \times PC(+) + fp \quad [18]$$

On $NE[C]$ és el cost esperat normalitzat, tp és el vertader positiu (true positive), fp és el fals positiu (false positive) i $PC(+)$ és la funció probabilitat-cost (Drummond & Holte, 2000).

Tal i com es mostra a la Figura 19, la línia contínua representa un classificador que sempre escull positius i la línia discontinua representa un classificador que sempre agafa negatius, és a dir, aquestes dues línies marquen els classificadors més extrems. El model més òptim, llavors, és aquell en el qual els seus classificadors dibuixen una corba situada entremig dels dos classificadors extrems i que alhora té un cost esperat normalitzat baix. Per tant, serà el que se situarà dins de l'àrea ombrejada del gràfic.

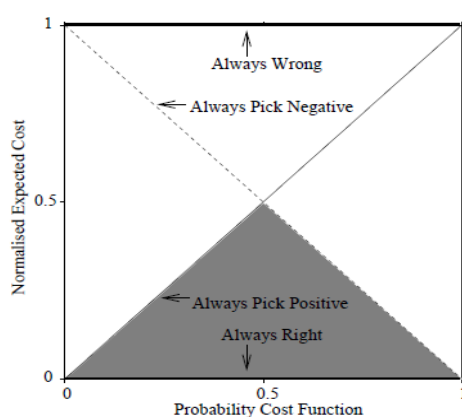


Figura 19. Gràfic que explica perquè les corbes situades a la part més inferior del gràfic marcan els models més acurats. **Font:** (Drummond & Holte, 2000).

En la figura següent es mostra la corba de cost d'un model utilitzat per fer un mapa de zonació. La intersecció dels diferents classificadors acaba dibuixant la corba de cost del model analitzat.

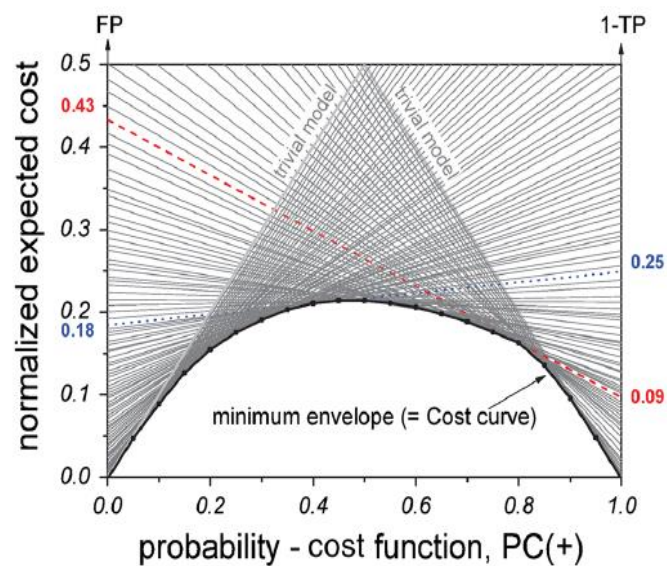


Figura 20. Exemple d'una corba de costos. **Font:** (Corominas et al., 2014).

3. PROPOSTA DE DESCRIPTORS D'INTENSITAT

3.1. Objectiu

Tal i com s'ha començat a explicar en el capítol anterior, històricament la intensitat de les esllavissades s'ha vist en un segon pla o, fins i tot, a vegades s'ha vist completament eclipsada per la magnitud. Ja sigui per errors de confusió entre els dos conceptes o per manca de dades d'inventari o de tecnologia que permetés la modelització d'aquests tipus de fenòmens, l'estudi de la capacitat destructiva de les esllavissades va pel darrere dels estudis fets per altres amenaces naturals com, per exemple, els terratrèmols o les allaus.

Mentre que per als dos darrers fenòmens existeixen escales estandarditzades que defineixen el seu potencial destructiu, com les escales de Richter i de Mercalli per als terratrèmols o l'Escala Europea de Perill per a les allaus, no n'hi ha cap d'estàndard ni d'oficial per a les esllavissades.

Altrament, aquestes presenten una complexitat afegida respecte als terratrèmols o a les allaus. Els diferents tipus d'esllavissada mostren mecanismes de ruptura i de propagació molt dispars, els quals s'han descrit en els punts 2.2.3 i 2.2.4, respectivament. Conseqüentment, els descriptors d'intensitat també són molt diferents segons quin sigui el tipus de fenomen donat.

Tornant a la definició de la intensitat citada al punt 2.2.7, es diu que aquesta ve determinada per una sèrie de paràmetres intrínsecs dels mecanismes de propagació de cadascun dels tipus d'esllavissada, és a dir, dels descriptors. Per tant, primer és necessari tenir ben clar quins són els descriptors més adients per a cada tipus d'esllavissada per tal de poder calcular la intensitat.

Prèviament, però, cal conèixer bé els mecanismes de propagació i la interacció entre el fenomen i els elements exposats de cada un dels tipus d'esllavissada per determinar quins són els descriptors d'intensitat més apropiats per a cadascun d'ells.

L'objectiu, doncs, és definir quins són els descriptors més adequats de cada un dels tres tipus d'esllavissada estudiats aquí (esllavissades, desprendiments rocosos i corrents d'arrossegalls), per així, a continuació, intentar trobar una escala d'intensitat per a cadascun d'ells i inclús, si els resultats són favorables, mirar d'aconseguir una equivalència entre les tres escales per obtenir-ne, finalment, una global.

Per aconseguir-ho, es farà una revisió bibliogràfica de diferents estudis publicats als darrers anys en revistes internacionals per tal d'entendre com és aquesta interacció entre els fenòmens i els elements exposats i quins danys provoquen, i veure quins descriptors s'utilitzen per, finalment, fer una discussió i una proposta dels que es poden considerar com els més adients.

3.2. Descriptors d'intensitat

Els descriptors són paràmetres que defineixen un concepte o una característica, en aquest cas la intensitat. Aquests paràmetres, doncs, variaran en funció del tipus d'esllavissada ja que cadascun dels tres té unes característiques mecàniques i cinemàtiques diferents. És per això, també, que tindran unitats diferents (de velocitat, de desplaçament, d'energia, etc.).

A més, aquests paràmetres permeten establir uns rangs de valors, els quals poden ser fàcilment associats a escales qualitatives d'intensitat que poden anar des de nivells d'intensitat molt baixos a baixos, mitjans, alts, molt alts o destrucció total (Corominas et al., 2014).

Tanmateix, tal i com passa amb l'avaluació de la vulnerabilitat dels elements exposats, en segons quins casos definir només un descriptor pot contribuir a incrementar els nivells d'incertesa en la determinació de la intensitat (Ciurean et al., 2017). És per això que, segons quina sigui la complexitat del tipus de fenomen, pot ser més adient definir-ne més d'un.

S'haurà de veure ara, però, si els diferents autors que es consultaran coincideixen a l'hora de definir o utilitzar els descriptors d'intensitat o si, en canvi, hi ha molta disparitat en l'elecció d'aquests. Aquesta possibilitat existeix degut a que, per una banda, com ja s'ha comentat anteriorment, les lleis físiques que regeixen alguns d'aquests fenòmens són complexes i no és tan trivial treure un o més d'un descriptor de manera estàndard. A part, entra en joc una certa subjectivitat que depèn també de com entengui el mecanisme de cada tipus d'esllavissada cadascun dels autors. Per una altra banda, els descriptors poden variar en funció de quin sigui l'element exposat avaluat ja que, per exemple, no seran exactament igual els descriptors d'intensitat de desprendiments rocosos agafats per analitzar els danys en un edifici que els seleccionats per analitzar la funcionalitat d'una barrera de mitigació perquè aquests dos elements tenen característiques i funcions diferents.

De fet, els descriptors són els paràmetres clau per als enginyers a l'hora de dissenyar les mesures de protecció i mitigació en els corresponents casos que es trobin.

Per tant, és necessari tenir clar els mecanismes de propagació dels fenòmens (veure punt 2.2.4) i la seva generació del danys sobre els elements exposats (veure punt 3.3) per determinar finalment quins són els descriptors més apropiats per a cada tipus d'esllavissada de manera que, a la pràctica, es puguin controlar i corregir degudament els seus efectes.

Per començar doncs, en el punt següent es fa una descripció de la interacció entre el fenomen i els elements exposats per tal de conèixer millor com i quins danys es generen, per després poder definir uns rangs de dany que equivalguin a uns graus d'intensitat i obtenir, així, una escala.

3.3. Interacció fenòmens - elements exposats

És important fer la descripció de la interacció entre cadascun dels fenòmens i els elements exposats perquè l'extensió dels danys generats no només depèn de les característiques de l'esdeveniment, sinó que també influeix la vulnerabilitat dels elements que es troben dins de l'àrea d'afectació d'aquest. A més, està comprovat que per al mateix esdeveniment (en termes d'intensitat) una zona més vulnerable experimenta danys majors.

De fet, cada cas pot ser completament diferent. Per exemple, edificis subjectes al mateix esdeveniment poden tenir diferents índexs de vulnerabilitat degut a les seves característiques estructurals (geometria, resistència, rigidesa, etc.). A part, pot passar també que edificis amb exactament les mateixes propietats tipològiques i estructurals pateixin més o menys danys depenent del mecanisme de ruptura i la seva ubicació respecte l'àrea font (Fotopoulou & Pitilakis, 2013).

Així doncs, a continuació es fa un repàs de les diferents casuístiques dividit per tipus d'esllavissada i tipus d'element exposat. En aquest punt es consideraran només els elements exposats següents: edificis, infraestructures (vies de comunicació) i persones.

3.3.1. Esllavissades

En el cas de les esllavissades es poden donar tres situacions:

1. Que l'objecte exposat es trobi a la zona de descarrega d'una esllavissada i li caigui el material desplaçat a sobre (tercera fila de la Figura 6).
2. Que l'objecte exposat es trobi just al damunt de la intersecció entre la superfície de ruptura i la superfície topogràfica (quarta fila de la Figura 6).
3. Que l'objecte exposat es trobi al damunt de la massa esllavissada (cinquena fila de la Figura 6).

3.3.1.1. Edificis

En la situació 1, les parets de l'edifici situats a la part que dona al vessant rebran l'impacte del material esllavissat o l'edifici sencer quedarà enterrat. Llavors, els danys aniran en funció del volum de la massa desplaçada, així com del tipus i contingut d'aigua del material d'aquesta, de la velocitat del moviment, i de la distància a la que es troba l'objecte respecte el peu del vessant esllavissat. Per tant, els danys resultants seran més o menys importants en funció de si aquests factors citats són més o menys elevats.

En el cas de que la pressió d'impacte resultant sigui més baixa, pot ser que les parets de l'edifici resisteixin de manera que no s'hi produeixin danys estructurals (només danys menors), pot ser que generi esquerdes i/o enderroqui portes i finestres permetent l'entrada de part del material caigut a l'interior de l'edifici i provoqui danys materials. O pot ser que la paret col·lapsi permetent una entrada major de material i produint danys materials més elevats, però sense arribar a generar danys estructurals. En aquests cas, doncs, els danys serien reparables.

En canvi, si la pressió d'impacte és més elevada, es produiran danys estructurals importants com són: col·lapse de la maçoneria, col·lapse parcial dels terres i sostres, esquerdes severes, etc. O, inclús, el col·lapse parcial o total de l'edifici. En aquest cas, per tant, l'element s'hauria de reconstruir.

En la segona situació, els danys no venen donats per una pressió d'impacte sinó que es produeixen a arrel de perdre part o el total del material que sustenta l'edifici. En aquest cas doncs, els factors més influents són la localització exacte de la intersecció entre la superfície de ruptura i la superfície topogràfica respecte l'edifici i la velocitat de desplaçament de la massa que s'esllavissa. En qualsevol cas, el resultat seria aparició d'esquerdes per tot l'edifici i el col·lapse parcial o total del mateix, de manera que la solució només és reconstruir.

Finalment, en la darrera situació, al ser la massa que sustenta l'edifici la que es mou, els danys principalment venen donats pels desplaçaments verticals i horitzontals tant totals com diferencials que es produeixen en la massa que s'està desplaçant. En el cas en que el desplaçament es produeixi de forma uniforme sota l'edifici, aquest patirà poc dany ja que tot ell es desplaçarà al ritme que ho faci el subsòl. Sí que es poden donar esquerdes o danys més importants si durant aquesta translació es produeix algun basculament important ja que la flexibilitat de l'estructura o dels elements no estructurals és limitada. Per altra banda, en el cas d'experimentar desplaçaments diferencials, els danys seran més greus degut a que diferents parts de l'edifici es mouran a diferents velocitats comproment fortament l'estabilitat estructural de l'edifici. Tanmateix, en funció de la velocitat d'aquests desplaçaments, els danys poden ser reparables o reconstruïbles.

Fent ara un repàs a la bibliografia, d'alguns dels estudis consultats s'han arribat als següent resultats i conclusions:

Sembla ser que els edificis poden tolerar millor el desplaçament i la velocitat del terreny que tenen a sota que no pas els serveis o altres estructures com els ponts. Per exemple, un desplaçament de menys de 100 mm/any pot provocar danys greus en ponts mentre que només causaria danys lleus i/o moderats en edificis i en serveis (Mansour et al., 2011).

S'ha comprovat que els danys provocats en edificis, carreteres, ponts i preses, entre d'altres, pot estar relacionat amb la velocitat o el desplaçament acumulat de les respectives esllavissades. Aquesta relació entre el moviment i els danys esperats pot ajudar als enginyers a controlar els diferents tipus d'esllavissada i a dissenyar les mesures de mitigació apropiades (Mansour et al., 2011).

Un edifici situat al damunt de la massa esllavissada es veurà afectat per desplaçaments verticals i horitzontals, mentre que un edifici situat al peu de l'esllavissada segurament haurà de suportar càrregues dinàmiques en les seves parets i, fins i tot, pot ser que acabi sent enterrat per la massa desplaçada (Guillard-Goncalves et al., 2016).

En el cas d'estructures situades a sobre d'una esllavissada ràpida, aquestes queden pràcticament destruïdes. En canvi, en el cas d'estructures situades al damunt d'una esllavissada lenta els danys seran menors i reparables (Li et al., 2010).

A (Fotopoulou & Pitilakis, 2013) es presenta un estudi per veure la reacció de dos tipus d'estructura de formigó armat sobre una mateixa esllavissada lenta. Una estructura és flexible, la qual presenta les fonamentacions independentment separades, i l'altre és pràcticament rígida ja que les fonamentacions estan unides, tal i com es veu a continuació:

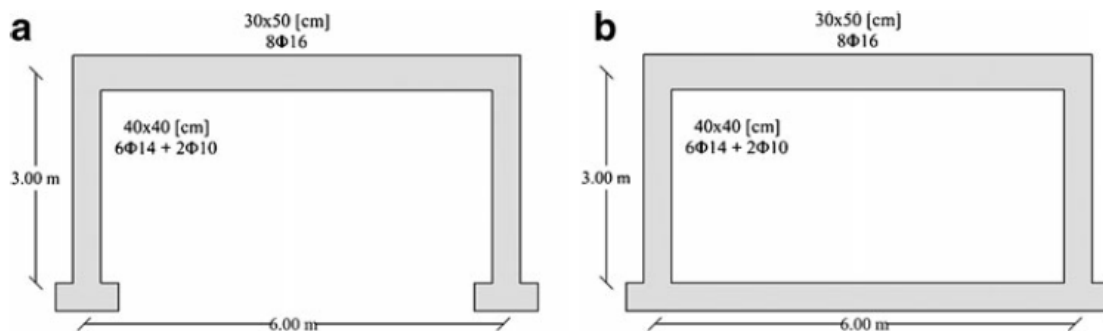


Figura 21. Representació dels dos tipus d'estructura estudiats. **Font:** (Fotopoulou & Pitilakis, 2013).

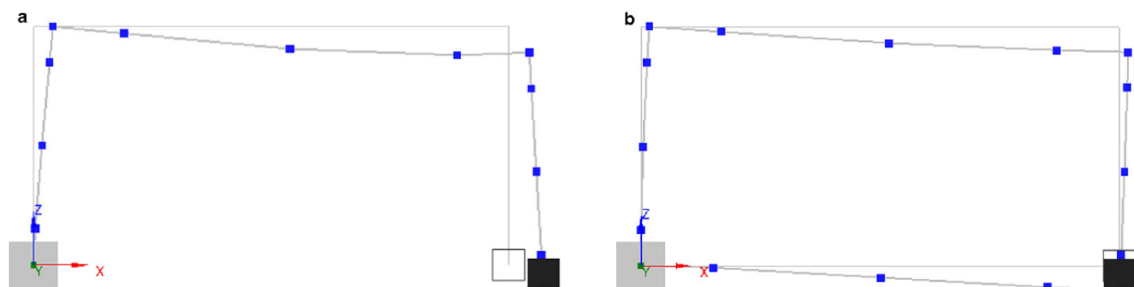


Figura 22. Representació dels resultats on es veu com es deforma cadascuna de les estructures. **Font:** (Fotopoulou & Pitilakis, 2013).

Els resultats van ser que, pel cas de l'estructura flexible, en les deformacions predominava el component horitzontal mentre que, per a l'estructura quasi bé rígida, hi predominava el component vertical, tal i com es mostra en la Figura 22.

A més, els resultats van mostrar un col·lapse de les columnes. Segons els autors, va ser degut a que la rigidesa axial de la biga en general és major que la rigidesa de flexió de les columnes. A part, van concloure que el número de plantes dels edificis no sembla ser un factor que impliqui més o menys dany al mateix quan aquest està subjecte a desplaçaments permanents.

Per altra banda, els resultats de l'estudi fet per (Antronico et al., 2015), van mostrar una correlació inversa entre la profunditat de la massa esllavissada i l'índex de dany i una correlació positiva entre la velocitat de desplaçament de les esllavissades i l'índex de dany. A part, també van apuntar que el fet que les estructures estiguin construïdes amb formigó armat no assegura l'obtenció de danys menors, a no ser que vagin acompanyades de mesures d'estabilització del pendent. Aquesta conclusió va ser fruit de que, en el seu estudi, alguns edificis de maçoneria localitzats dins de l'àrea de l'esllavissada no van patir danys rellevants.

3.3.1.2. Infraestructures

Pel que fa a les infraestructures, en la primera situació la generació de danys dependria dels mateixos factors que en el cas dels edificis, però els danys produïts serien una mica diferents. En aquest cas, les vies de comunicació quedarien enterrades per la massa esllavissada de manera que el transit quedaria aturat. Per solucionar-ho només caldria retirar el material corresponent i, en cas d'haver sigut un esdeveniment molt intens, fer alguna reparació lleu (reparar les parts de l'asfalt malmeses o canviant els rails de les vies de tren afectats).

En la segona situació, en canvi, els danys serien més severos degut a que es produiria un col·lapse parcial o total del tram afectat per l'esdeveniment. En aquest cas, per tant, s'haurien de fer feines de reconstrucció per solucionar-ho.

Per últim, en la tercera situació, passaria com en el cas dels edificis, el grau de danys aniria en funció de si es produeixen desplaçaments continus o diferencials i si ho fan d'una manera més ràpida o més lenta. Si és ràpida, apareixerien esquerdes importants o, inclús, esvorancs, de manera que s'haurien de reconstruir les parts afectades. En canvi, si és lenta, a mesura que anessin apareixent les esquerdes o els esvorancs es podrien anar reparant perquè no anessin a més.

3.3.1.3. Persones

En el cas de les persones la situació canvia completament degut a que aquestes, a diferència dels edificis i de les infraestructures, no són estàtiques i, per tant, poden tenir l'opció d'escapar si les característiques dels esdeveniments ho permeten.

En els tres escenaris exposats, les persones tant si estan dins com fora dels edificis podran escapar en funció de la velocitat i del volum de la massa desplaçada. En el cas de no poder-ho fer, els danys aniran des de lleus fins a molt greus o a la no supervivència, depenent del cas.

(Li et al., 2010) diuen que en el cas de les persones, si es troben fora dels edificis, depenent del volum i de la velocitat poden escapar o poden veure's afectades però, si es troben dins dels edificis segurament no sobreviuran.

3.3.2. Despreniments rocosos

Pel que fa als despreniments rocosos es poden donar els escenaris següents:

1. Que es desprengui una porció gran de sòl o roca (despreniment de grans dimensions o allau de roques) vessant avall i l'objecte exposat es trobi situat al peu del mateix (primera fila de la Figura 6).
2. Que es desprengui un sol bloc o més d'un però sempre de forma individual vessant avall i l'objecte exposat es situï just al peu del mateix (segona fila de la Figura 6).

3.3.2.1. Edificis

En el primer escenari, el grau de dany estaria altament relacionat amb l'energia cinètica del material després. Degut a que l'energia cinètica està composta per la massa i la velocitat de la porció que cau vessant avall, quan més elevats fossin els valors d'aquests dos factors, més elevada seria l'energia cinètica i més elevada seria també la pressió d'impacte que hauria de suportar l'edifici. A part, també influeiria el volum de material després i la distància a la que es trobés l'element respecte el peu del vessant.

Així doncs, si la massa despresa impacta contra la coberta o contra els murs de l'edifici, la suma de les pressions d'impacte del material provocarà un col·lapse parcial o total d'aquest i, per tant, s'haurà de reconstruir.

Per altra banda, en l'escenari 2, el grau de dany també vindria caracteritzat pels factors anteriors, a més del número i la freqüència de blocs despresos. No és el mateix que caigui un bloc de forma puntual o que ho faci més d'un.

Per tant, si es desprèn un bloc amb una energia cinètica insuficient per destruir un element estructural, només ocasionarà danys no estructurals en les parets o en els pilars com esquerdes, bombaments o forats. Si es desprèn més d'un bloc, els danys seran els mateixos però multiplicats pel nombre d'impactes.

En canvi, si el bloc o els blocs que es desprenen es desplacen amb una energia cinètica relativament alta, els danys seran més importants degut a que els valors de les pressions d'impacte també seran més elevats. Llavors, els impactes poden ensorrar parets i/o pilars de l'edifici, així com sostres i terres, provocant el col·lapse parcial o total d'aquest. A més, serà important veure en quin punt de l'edifici es produeix l'impacte ja que les conseqüències seran diferents si topa contra una paret o contra un pilar secundari que si ho fa contra un pilar principal a part que, depenent del pilar que col·lapsi, es pot produir una reacció en cadena que acabi provocant el col·lapse total del mateix.

En l'estudi presentat per (Mavrouli & Corominas, 2010a), s'estudia aquest factor donat per la localització de l'impacte d'un sol bloc sobre l'estructura de l'edifici i la relació de danys que pot causar. Diuen que, en estructures de formigó armat, la localització de l'impacte en la façana de l'edifici és fonamental. El dany que pot provocar el bloc a un element no estructural no és crític per a l'estabilitat de l'edifici, però el col·lapse d'un element estructural com una columna o una biga, en canvi, pot iniciar un col·lapse progressiu del mateix. Finalment, conclouen dient que per a una energia cinètica suficient per destruir una columna, el dany serà local o parcial de manera que es podrà reparar. En canvi, si el col·lapse es dona en més d'una columna, el dany serà major provocant que s'hagi d'optar per reconstruir en comptes de reparar.



Figura 23. Imatge d'un taller situat a Santa Coloma (Andorra) on un bloc de 30 m³ va impactar contra un dels seus murs. En aquest cas no va haver danys estructural ja que no va impactar contra cap pilar. Font: (Mavrouli & Corominas, 2010a).

3.3.2.2. Infraestructures

En aquest cas, tant en la primera situació com en la segona, els danys provocats seran el cobriment o l'obstrucció de la via, provocant la interrupció del transit de vehicles. Depenent de l'energia cinètica i del volum del material després, els danys aniran des de lleus a moderats, de manera que es podran solucionar amb la retirada dels blocs o fent reparacions allà on s'hagin produït els impactes.

3.3.2.3. Persones

Pel que fa a les persones tan a l'aire lliure com a l'interior d'edificis i vehicles, passa igual que amb les esllavissades. En la primera situació és molt difícil poder escapar degut a la gran velocitat i magnitud del fenomen. En el segon escenari, però, depenent de l'energia cinètica i de la magnitud de l'esdeveniment, les persones poden arribar a escapar. Si no ho poden fer, els danys seran des de lleus fins a la no supervivència, depenent també de la mida i la velocitat del material caigut o del dany resultant de l'edifici o del vehicle que estiguin ocupant.

Tanmateix, existeixen dues casuístiques per a les persones que es troben a l'interior dels vehicles. En el cas de es produeixi un desprendiment rocós quan estiguin circulant per una via, pot passar que el bloc impacti al damunt del vehicle o bé que el bloc estigui situat a la via i el vehicle topi contra ell. En tots dos casos, els danys aniran des de lleus fins a la mort en funció de la magnitud del bloc, la força d'impacte i el punt d'impacte.

3.3.3. **Corrents d'arrossegalls**

Finalment, les situacions que es poden donar per a corrents d'arrossegalls, són les següents:

1. Que l'objecte exposat es trobi situat dins de la trajectòria del corrent d'arrossegalls al llarg del vessant de manera que aquest impacti contra l'element (sisena fila de la Figura 6).
2. Que l'objecte exposat estigui situat dins del con de dejecció del corrent d'arrossegalls de manera que aquest impacti contra l'element exposat (setena fila de la Figura 6).

Tal i com exposa (Quan Luna et al., 2012), els corrents d'arrossegalls tenen la capacitat de propagar-se al llarg de grans distàncies a altes velocitats, fent que els danys per a les persones i per a les propietats siguin majors que els produïts per els altres tipus d'esllavissada.

3.3.3.1. Edificis

En el primer escenari, els danys vindran provocats per la pressió d'impacte del corrent d'arrossegalls i, per tant, per la velocitat i l'alçada del flux, així com pel contingut d'aigua i per la profunditat d'arrossegalls. De fet, (Jakob et al., 2012) i (Sterlacchini et al., 2014) així com altres autors, defineixen la pressió d'impacte com la multiplicació de l'alçada del flux per la velocitat del flux al quadrat.

Així doncs, depenent de la força d'impacte, tant del flux com dels blocs del front que són empesos pel corrent, els danys seran majors o menors. Aquests poden anar des de danys no estructurals amb pèrdues materials si el flux aconsegueix enderrocar finestres i portes i colar-se a l'interior dels edificis, a danys estructurals lleus, com la generació de desplaçaments verticals, degut a les vibracions de l'impacte, els quals poden provocar esquerdes o col·lapses de parets o fins i tot pilars, arribant a ocasionar danys estructurals severos com el col·lapse parcial o total de l'edifici.

Cal notar la incisió que es fa de l'impacte donat pels blocs que es transporten en la part frontal del corrent d'arrossegalls. Tal i com van analitzar i concloure (Scheidl et al., 2013), els valors de la pressió pic al front del corrent estudiat van ser deu vegades majors en comparació amb els valors mitjans de pressió pic al llarg de tota l'onada de propagació de l'esdeveniment. A partir d'un anàlisi amb vídeo, van veure que aquest fet era degut a l'impacte de blocs individuals, ocasionalment dissociats del front del flux.

En el segon cas, els danys també vindran donats per la pressió d'impacte del flux tot i que, en aquesta situació, influirà la distància a la que es trobi l'objecte dins de l'àrea d'influència del fenomen. Si es troba relativament a prop de la zona de descàrrega els danys seran més greus que si per contra es troba a una zona més distal del con de dejecció, ja que el flux haurà perdut energia i la pressió d'impacte serà menor.

Aquesta darrera situació la comenten (Dai et al., 2002), els qual diuen que els danys ocasionats seran majors en els edificis que es trobin a la base del vessant on es doni l'esdeveniment, en comparació amb els danys que es produiran en els edificis que es trobin als límits de la zona de descàrrega del mateix.

3.3.3.2. Infraestructures

Pel que fa a les infraestructures, els danys resultants són similars als provocats per les esllavissades i per la caiguda de blocs en massa. Aquests poden anar des de danys menors fins a danys moderats en funció del contingut d'arrossegalls i la velocitat del flux, els quals poden provocar una erosió en les vies de comunicació. En tot cas, els trams afectats per l'esdeveniment quedaran coberts pel material arrossegat i es podrà solucionar netejant la calçada o la via, o reconstruint aquelles zones que quedin més malmeses.

3.3.3.3. Persones

En el cas de les persones, en ambdues situacions pot ser que puguin escapar si la magnitud i la velocitat de l'esdeveniment ho permeten. En el cas de que no ho aconsegueixin, en la primera situació, tant si es troben a l'interior o a l'exterior d'edificis o vehicles, la probabilitat de supervivència serà molt petita degut a la gran força destructiva d'aquest tipus de fenomen. En la segona situació, el grau del dany variarà també en funció de la distància respecte al vessant on es trobi la persona.

Revisant la bibliografia s'han trobat els comentaris següents:

La pèrdua de vides en el corrents d'arrossegalls està comunament relacionada amb el dany o el col·lapse de l'edifici (Jakob et al., 2012).

En el cas de la vulnerabilitat de les persones a l'exterior d'edificis i vehicles, el nivell d'intensitat de la mescla de sòl i aigua que forma el flux, a vegades ofereix a la gent exposada la possibilitat de trobar un refugi a temps. En el cas de no trobar-lo, les conseqüències més greus en termes de pèrdua de vida humana són les esperades (Ferlisi et al., 2016).

3.4. Revisió bibliogràfica de descriptors d'intensitat d'esllavissades

De tota la bibliografia consultada, la qual es llista en el punt 7, només han sigut unes poques les referències de les que s'han pogut extreure descriptors d'intensitat dels tres tipus d'esllavissada estudiats aquí. El recull dels descriptors es pot veure en les taules de l'ANNEX III, en les quals s'han separat els descriptors per tipus d'esllavissada.

3.5. Discussió dels resultats i proposta de descriptors d'intensitat

Fet el recull bibliogràfic, s'ha observat que els descriptors de cada tipus d'esllavissada més o menys es van repetint (veure ANNEX III). Per observar els resultats d'una manera més visual, en el mateix ANNEX III es mostren els descriptors en tant per cent a partir de gràfics circulars.

Observant els gràfics, doncs, es pot veure que sí hi ha una tendència a que alguns descriptors siguin utilitzats per varis autors. Per tant, tot i que els fenòmens presenten les seves complexitats, i els danys generats als elements exposats depenguin en part de les característiques dels mateixos, sembla ser que algunes característiques dels fenòmens funcionen bé generalment per a diferents casos. Així doncs, es podrien fixar uns descriptors per a cada un dels tipus d'esllavissada que, allà on s'apliquessin, resultarien ser pràctics i llavors, a part, definir uns específics, els quals només serien aplicables en algunes situacions o estudis concrets.

A part, els resultats mostren que en cap dels tres casos hi ha un descriptor únic que destaquí notablement respecte als demés, sinó que és un conjunt d'aquests els que ho fan. Això recolzaria el comentari fet en el punt 3.2 on es diu que, el fet de basar-se sols en un descriptor implica treballar amb un grau d'incertesa més elevat degut a la complexitat dels fenòmens.

No obstant, en el primer punt d'aquest capítol s'ha explicat la importància de conèixer molt bé el comportament d'aquests fenòmens, tant a l'hora de formar-se i propagar-se com a l'hora de ocasionar danys sobre els elements exposats, per veure, llavors, quin són els descriptors més adients per a cadascun d'ells.

Per tant, vist els resultats obtinguts de la revisió bibliogràfica, ja se sap més o menys quins poden ser els descriptors més aplicables a la pràctica. A continuació es fa l'elecció de la proposta a partir de la teoria explicada en els punts anteriors (veure punt 2.2.4 i 3.3) i s'estudia, finalment, el grau de coincidència per extreure'n les conclusions. La proposta realitzada en aquest projecte, doncs, és la que es mostra en la Taula 1.

No obstant, abans de fer cap raonament, és necessari justificar el desplaçament acumulat com a descriptor específic de les esllavissades lentes ja que, a diferència dels altres descriptors específics, aquest no apareix anteriorment en el punt 3.3. (Mansour et al., 2011) conclouen que en esllavissades lentes, on una massa de sòl o roca es desplaça al llarg de la superfície topogràfica, el que controla els danys no és tant la taxa de desplaçament anual (mm/any o m/any) sinó que és el desplaçament acumulat. És a dir, si una esllavissada es mou a 5 mm/any

i no es treballa per controlar-la o mitigar-la perquè és una taxa molt baixa, al cap de deu anys el desplaçament acumulat serà de 50 mm i aquest valor potser sí que causarà danys en algunes estructures o línies de serveis.

Dit això, tal i com es pot comprovar, els descriptors surten sobretot del punt 3.3, és a dir, s'han escollit els descriptors a partir de la informació que es dona sobre com els fenòmens interactuen amb els elements exposats i com els hi provoquen danys.

És important tenir present els danys potencials als objectes per seleccionar els descriptors ja que aquests, a part de servir per trobar després unes escales d'intensitat, també serveixen als enginyers a dissenyar i construir les mesures de protecció contra els fenòmens.

Fent una comparativa entre aquesta proposta i els descriptors escollits pels diferents autors al llarg de la història per fer els seus estudis es pot veure que, efectivament, tots acaben coincidint. Això es deu a que tant uns com altres s'acaben basant en els comportaments dels fenòmens i els danys que han provocat al llarg del temps.

Fenòmens	Descriptors d'intensitat	
	Comuns	Específics
Esllavissades	<ul style="list-style-type: none"> • Contingut d'aigua de la massa desplaçada • Desplaçaments verticals i horitzontals • Proximitat al vessant i a la superfície de ruptura • Velocitat de la massa desplaçada • Volum de la massa desplaçada 	<ul style="list-style-type: none"> • Desplaçament acumulat (en esllavissades lentes, molt lentes i extremadament lentes)
Despreniments rocosos	<ul style="list-style-type: none"> • Energia cinètica del bloc després • Massa del bloc després • Velocitat del bloc després • Volum del bloc després 	<ul style="list-style-type: none"> • Alçada de la trajectòria del bloc (en el cas de que els elements exposats analitzats siguin barreres de mitigació)
Corrents d'arrossegalls	<ul style="list-style-type: none"> • Alçada d'acumulació • Alçada del flux • Pressió d'impacte • Profunditat del flux • Profunditat dels arrossegalls • Velocitat del flux • Volum del flux 	

Taula 1. Proposta de descriptors d'intensitat d'esllavissades, desprendiments rocosos i corrents d'arrossegalls.

La proposta intenta ser el més global i adaptable possible a cada cas, siguin quines siguin les característiques i les condicions de cadascun dels esdeveniments que es donin. No obstant, comparant-la amb els descriptors de la bibliografia, en la darrera apareixen descriptors puntuals o molt concrets del cas estudiat que no s'han contemplat en la seva totalitat en la part d'específics.

És obvi que cada esdeveniment és diferent i gairebé únic degut a que la geologia, la topografia, el plantejament territorial, les poblacions, les condicions climatològiques, etc. són molt variables al llarg del territori i també del temps, de manera que hi haurà casos on caldrà considerar algun descriptor específic no inclòs en la Taula 1. d'aquest projecte per acabar de caracteritzar el determinat esdeveniment.

Una altra cosa a tenir en compte és que el fet de proposar “x” descriptors per a un tipus de fenomen no implica que s'hagin de tenir en compte tots ells. L'aplicació dels descriptors moltes vegades ve donada per les dades d'inventari o de camp que hi hagi disponibles. Tot i així, quants més descriptors dels proposats s'agafin, menys incerteses es produiran. A part, és convenient deixar clar que els descriptors específics són totalment complementaris als comuns, és a dir, no perquè hi hagin descriptors específics proposats s'està dient que només s'hagin d'aplicar aquells, sinó que es poden agafar juntament amb els que estan dins de la classificació dels comuns.

3.6. Comparativa amb altres amenaces naturals

La mesura de la intensitat, a l'igual que varia entre els tres tipus d'esllavissada perquè va definida en funció de les característiques de cada fenomen, també varia quan es tracta d'altres amenaces naturals com els terratrèmols, els tsunamis, les allaus, els huracans o les inundacions, entre d'altres.

En aquest punt es fa una breu descripció i comparativa del concepte d'intensitat de cadascuns dels riscos naturals citats.

3.6.1. Terratrèmols

Tant el concepte d'intensitat com el de magnitud canvia en el cas dels terratrèmols respecte a les esllavissades. En el camp de la sismologia, la magnitud es defineix com un paràmetre físic que mesura l'energia irradiada o alliberada en el focus del terratrèmol i no contempla els efectes macrosísmics (Papadopoulos & Imamura, 2001). Aquesta es basa en la màxima amplitud de les ones sísmiques del cos o de la superfície (Elnashai & Di Sarno, 2008). La intensitat està altament relacionada amb l'acceleració i la velocitat (Sánchez, 1994) i descriu qualitativament els efectes dels macrosismes, és a dir, dels efectes del terratrèmol en una zona específica feta a partir de la observació del dany generat i la reacció de la gent que l'ha patit, i per tant, és bastant subjectiva (Papadopoulos & Imamura, 2001). (Avellaneda & Harlem, 2011) diu que els millors descriptors per determinar el potencial destructiu dels terratrèmols són: el PGV (Peak Ground Velocity), el PGA (Peak Ground Acceleration) i el PGD (Peak Ground Displacement).

Tanmateix, els terratrèmols i les esllavissades sí coincideixen en un fet: cada esdeveniment està determinat per una sola magnitud però pot venir definit per més d'una intensitat dins de l'àrea afectada (Papadopoulos & Imamura, 2001).

(Jakob et al., 2012) apunten que una manera de descriure la vulnerabilitat de les estructures davant de corrents d'arrossegalls és la que exposen (Haugen & Kaynia, 2008), els quals van estudiar com el moviment vibratori dels terratrèmols pot utilitzar-se per preveure el dany induït per corrents d'arrossegalls. La teoria de (Haugen & Kaynia, 2008) estableix que les vibracions del sòl provocades per un terratrèmol damnificarà una estructura donada de la mateixa manera que ho farien les forces vibratòries provocades per l'impacte d'un corrent d'arrossegalls. L'acceptació d'aquesta hipòtesi permetria l'ús d'una gran quantitat de bibliografia sobre vibració sísmica en les estructures i, conseqüentment, transferir l'aplicació de les corbes de fragilitat dels terratrèmols als corrents d'arrossegalls. La dada d'entrada per a la corba seria el desplaçament espectral que correspon amb el desplaçament màxim durant un terratrèmol. El desplaçament espectral equivalent al corrent d'arrossegalls es podria calcular a partir de la suma del desplaçament espectral hidrostàtic i el desplaçament espectral dinàmic. Per calcular els desplaçaments espectrals es necessita la velocitat i la profunditat del flux. (Jakob et al.,

2012) apunta també que aquesta hipòtesi es va comparar amb l'estudi fet per (Sarno, 1998) i el resultat va ser que es van preveure els danys de l'edifici de forma precisa 5 de 6 vegades.

3.6.2. Tsunamis

Els tsunamis són conseqüències dels terratrèmols. De fet, s'ha demostrat que la profunditat del focus del terratrèmol i la geometria focal exerceixen un paper limitat en el control de l'amplitud del tsunami important, i que són més influents els efectes de la directivitat deguda a la propagació de la ruptura al llarg de la falla i de la possibilitat d'un augment de l'excitació del tsunami en materials amb propietats elàstiques més dèbils, com les capes sedimentàries. D'aquesta manera, doncs, el tsunami es pot considerar un cas particular d'ona sísmica i, conseqüentment, els problemes relacionats amb la quantificació del tsunami es podrien abordar de forma anàloga a la sismologia (Papadopoulos & Imamura, 2001).

Els tsunamis, a l'igual que passa amb els terratrèmols, utilitzen la intensitat per mesurar la mida de l'esdeveniment (Gusiakov, 2011). Aquests, es caracteritzen per una banda amb paràmetres mesurables objectiva i quantitativament (com la magnitud dels terratrèmols) i, per l'altra, amb descripcions subjectives que intenten definir i reflectir l'escala i el grau de destrucció provocada per l'ona (com passa amb la intensitat dels anteriors). Anàlogament als terratrèmols, els paràmetres que tenen més pes són els subjectius degut a que la població no es preocupa de l'energia de l'ona del tsunami sinó que s'interessa per com els afectarà i com poden mitigar els efectes (Levin & Nosov, 2009). Els autors fins i tot creuen que aquest fet es mantindrà així fins que es desenvolupin més models que considerin tot el procés, començant per la formació de la ona fins que arriba a la costa i es propaga pel continent fins dissipar-se.

En l'estudi de (Gusiakov, 2011) es demostra que la intensitat dels tsunamis induïts per sismes està controlada principalment, però no totalment, per la magnitud del terratrèmol i, a més, mostra una tendència general de creixement si la magnitud augmenta. A part, donen la dada següent: les alçades del tsunami a la costa poden diferir més de 64 vegades per a terratrèmols donats amb magnituds similars.

(Papadopoulos & Imamura, 2001) mostren molt bé com ha influït al llarg de la història la magnitud en el càlcul de la intensitat. Tal i com expliquen, al llarg del temps s'han proposat escales d'intensitat agafant com a descriptor l'alçada de la onada com les proposades per Soloviev al 1970 i Shuto al 1993, de manera que s'acostaven més a escales de magnitud que d'intensitat, tal i com expliquen els autors. Ells expliquen que les escales d'intensitat no es basen en paràmetres físics del fenomen sinó que es fan a partir de les observacions sobre el grau d'impacte del mateix i fan la reflexió de que seria interessant fer una correlació dels graus d'intensitat amb paràmetres físics com l'acceleració del sòl. Al final de l'estudi, els autors fan una proposta d'escala d'intensitat la qual depèn de l'amplitud (o l'alçada) d'ona mesurada o macroscòpicament observada tant en la font del tsunami com en la costa afectada, o de la pertorbació de l'aigua del mar en qualsevol punt d'observació.

Per tant, encara hi ha molt per estudiar dins el camp de la intensitat dels tsunamis i, per ara, el descriptor més aplicat és l'alçada d'ona o de la pertorbació de l'aigua del mar.

3.6.3. Allaus

Pel que fa a les allaus, la intensitat s'entén d'igual manera que ho fan les esllavissades. Tal i com citen (Vada et al., 2012), el concepte d'intensitat fa referència al conjunt de característiques d'una allau amb incidència en la seva capacitat de produir dany.

De fet una mostra de les similituds entre aquests dos camps és la existència de models de propagació d'esllavissades basats en models d'allaus i comparatives d'altres conceptes. Per

exemple, (Dorren, 2003) explica que (McClung & Lied, 1987) van desenvolupar un model basat en un altre model per estimar la distància de propagació de les allaus. Un altre exemple és el de (Quan Luna et al., 2011) quan diuen que comparen la funció de vulnerabilitat de la pressió d'impacte amb dues funcions utilitzades en la gestió del risc d'allaus.

Pel que fa als descriptors d'intensitat, aquest són comparables a les esllavissades, concretament als desprendiments rocosos i als corrents d'arrossegalls ja que, majoritàriament, venen determinats per les pressions d'impacte (Keylock & Barbolini, 2001; Papathoma-Köhle et al., 2011; Vada et al., 2012) i, en alguns casos es complementen amb la profunditat del flux de neu (Barbolini et al., 2004).

(Keylock & Barbolini, 2001) mostren l'equació següent per calcular la pressió d'impacte de les allaus:

$$p_{imp} = \rho \bar{u}^2 \quad [19]$$

On ρ és la densitat de la neu i \bar{u} la velocitat. Aquesta equació és aplicable a situacions en les que el flux no pot fluir lliurement sobre l'obstacle, sinó que pateix un impacte i una compactació inelàstica. Aquest cas és el més probable per als edificis.

3.6.4. Huracans

Els huracans són pertorbacions atmosfèriques en rotació, el diàmetre de les quals pot anar dels menys de 100 km fins als més de 1500 km. En el centre hi ha l'anomenat ull de l'huracà on s'hi produeix una calma atmosfèrica absoluta i el qual està o cobert per núvols trencats o lliure de cap nuvolositat permetent veure un cel serè. Aquest ull és format gràcies a la força angular dels vents, els quals es queden envoltant el centre ja que, degut a la mateixa força angular, no poden arribar mai a l'interior. Conseqüentment, la velocitat dels vents en les parets que formen l'ull és extremadament alta (Alexander, 1993; Houze et al., 2007).

És per això mateix que els descriptors d'intensitat dels huracans són les velocitats màximes dels vents i les resistències màximes dels vents superficials (Houze et al., 2007; Sterlacchini et al., 2014). A part, degut a l'arquitectura dels huracans, les màximes intensitats es donaran just al voltant dels ulls dels mateixos (Houze et al., 2007).

3.6.5. Inundacions

Les crescudes fluvials són la conseqüència d'altres fenòmens o factors naturals, les quals poden ser degudes a un sol factor o a un conjunt d'aquests. Les causes doncs, ja vagin soles o en conjunt, poden ser les següents: pluges intenses, pluges persistents i desgel de grans acumulacions de neu (Khan, 2013).

En aquest cas, els conceptes d'intensitat i magnitud es defineixen de la mateixa manera que en les esllavissades. Per tant, la magnitud ve determinada per la intensitat i distribució de la pluja i les característiques de la zona de captació (Richards, 1944), mentre que la intensitat ve donada pel cabal, la velocitat i la profunditat de la làmina d'aigua (Khan, 2013; Kusumastuti et al., 2007; Merz et al., 2007; Papathoma-Köhle et al., 2011), sent aquests els descriptors d'intensitat.

A part d'aquesta equivalència de conceptes entre les inundacions i les esllavissades, també està la determinació dels danys causats per aquests dos fenòmens. Així ho mostren (Petrucchi & Gullà, 2010) quan diuen que apliquen la mateixa classificació dels danys que s'utilitza en les inundacions per al cas de les esllavissades.

4. PROPOSTA D'ESCALA D'INTENSITAT

4.1. Introducció

En el capítol anterior s'ha vist que els descriptors són paràmetres clau alhora de dissenyar i construir barreres de mitigació de danys causats per esllavissades i, a més, són la base per trobar la intensitat d'aquests fenòmens. Seria molt pràctic, doncs, tenir una escala estàndard que servís per determinar, de forma pràctica i ràpida, la intensitat de qualsevol esllavissada. Aquest és l'objectiu del capítol 4.

Les escales d'intensitat poden anar en funció dels paràmetres que es vulgui. No obstant, existeix la limitació de les dades d'inventari i dels estudis publicats al llarg de la història, de manera que al final s'acaba treballant més amb el que es pot abans que amb el que es vol. La idea inicial és intentar trobar unes escales d'intensitat per a cadascun dels casos que s'indiquen en la Taula 2. No obstant, s'haurà de veure quines dades són les disponibles per fer-les de manera que es pugui garantir un cert grau de confiança i fiabilitat de les dades perquè, al no fer-se cap test de resistència de materials ni similar en aquest projecte, cal tenir el recolzament de dades que hagin sigut obtingudes en altres estudis.

Paràmetres de les escales d'intensitat inicials		
Tipus fenòmens	Descriptors	Elements Exposats
Esllavissades	Desplaçament diferencial	Edificis de formigó armat Edificis de pedra i maçoneria
	Velocitat de desplaçament	
Despreniments rocosos	Energia cinètica	Infraestructures
Corrents d'arrossegalls	Alçada de flux	Persones a l'aire lliure
	Velocitat del flux	Persones dins d'edificis
	Pressió d'impacte	

Taula 2. Objectiu inicial d'escala d'intensitat.

Ja d'entrada es veu que, en aquest cas, la llista de descriptors ha disminuït respecte la proposada en el punt 3.5. Això es deu a que amb la revisió de la documentació bibliogràfica per a la proposta de descriptors, s'ha observat que aquells que s'havien aplicat més a la pràctica eren aquests que apareixen en la Taula 2. Això, doncs, pot ser un dels indicadors que mostren el que es deia en el paràgraf anterior de que al final s'acaba treballant amb les dades que es tenen i les que són més assequibles d'aconseguir, en comptes de treballar amb tot el conjunt de dades que es voldria.

Per fer aquesta escala, doncs, es farà una revisió bibliogràfica per tal de veure quina és la informació sobre la intensitat existent i veure quines escales d'intensitat d'esllavissades s'han proposat en articles publicats al llarg de la història i, a partir d'això, construir una bona proposta i fer una petita comparativa discutint-ne les coincidències i les discrepàncies.

Per tant, la metodologia a seguir per arribar a l'escala d'intensitat és la següent: primerament definir uns escenaris per tal d'acotar unes condicions i unes situacions que seran les que haurà de complir l'escala d'intensitat proposada. A continuació, buscar una escala de danys, la qual vagi associada a uns rangs de vulnerabilitat perquè aquests rangs són els que permetran establir les equivalències entre els diferents valors d'intensitat de cada un dels tipus d'esllavissada per construir una de global. Seguidament, buscar aquells valors dels descriptors que provocarien els danys descrits anteriorment. Finalment, es farà l'acoblament de totes les dades trobades per fer una proposta d'escala global que serveixi per a tots els casos.

Els punts que venen a continuació, doncs, s'han establert seguint l'ordre de la metodologia aplicada per a l'estudi i l'obtenció de l'escala d'intensitat.

4.2. Definició d'escenaris i descriptors

En els capítols anteriors s'ha vist la complexitat que presenta el camp dels esllavissaments del terreny. Un dels punts que millor reflexa aquesta complexitat és l'explicació de l'equació del risc, la qual mesura aquest a partir de la suma de la probabilitat d'ocurrència, de la probabilitat de que l'esdeveniment arribi a un punt "x", la probabilitat de que en el punt "x" hi hagi un element exposat, de la vulnerabilitat de l'element exposat i del seu cost.

Tanmateix, cadascun dels elements de l'equació del risc ve determinat per un conjunt de factors, els quals poden ser molt variats tal i com s'indica a continuació:

- La probabilitat d'ocurrència vindrà determinada per la geologia (materials de granulometria petita, de granulometria gran, cohesius, no cohesius, tous, durs, etc.), la geomorfologia (parets verticals, pendents pronunciats, pendents suaus, etc.), la mecànica del sòl o del massís rocós (terreny saturat, terreny no saturat, terreny molt fracturat, terreny poc fracturat, terreny fràgil, terreny dúctil, etc.) i la climatologia de la zona (episodis curts de precipitacions molt intenses, períodes llargs de precipitacions poc intenses, increments de temperatura que afavoreixen el desgel, etc.), entre d'altres.
- La probabilitat de que l'esdeveniment arribi a un punt "x" anirà en funció de la cinemàtica i dinàmica del fenomen, del material que cobreixi el terreny per on es desplaça, el pendent del vessant, les trajectòries que es segueixin, etc.
- L'exposició de l'element variarà depenent de si l'element es troba dins de la trajectòria de l'esdeveniment, de si està situat en un punt més pròxim o més distal de l'àrea font, de si és estàtic (com un edifici) o mòbil (com una persona) de manera que en aquest últim cas té una possibilitat d'escapar, etc.
- La vulnerabilitat de l'element exposat dependrà de les característiques del mateix, com, per exemple, els materials de construcció o la geometria en el cas dels edificis o del número d'hores que ocupi un edifici exposat una persona, etc.
- Els costos vindran en funció del tipus d'edifici, del preu del m² que estableixi un govern o una administració, del preu que les asseguradores li posen a la pèrdua d'una vida humana, etc.

Per tant, el que es vol dir amb tot això, és que hi ha una multitud d'escenaris possibles i, malauradament, resulta impossible trobar una escala d'intensitat que sigui aplicable per a tots aquests casos, i en un període de temps limitat. És per això que es definirà un seguit d'escenaris possibles (els quals s'intentaran ajustar als que es donen sovint a la realitat) i es buscaran unes escales d'intensitat que siguin aplicables dins de les condicions establertes.

4.2.1. Escenari 1 (esllavissades)

El primer escenari es situa en una zona inestable on periòdicament es reactiven esllavissades preexistents o s'activen de noves degut, generalment, a episodis de pluja intensa o a l'activitat humana com l'excavació del terreny per a la construcció. Així doncs, els moviments plantejats succeeixen de manera intermitent de manera que poden estar actius des de hores fins a mesos o anys.

Els elements exposats inclouen edificis amb estructura de formigó armat, edificis de maçoneria (o pedra), infraestructures com carreteres, persones a l'aire lliure i persones a dins d'edificis. Tots ells s'hi troben just al damunt de la massa que s'està desplaçant.

Aquesta situació, per tant, es correspondria amb la descrita en el punt 3.3.1, concretament seria l'escenari d'un edifici situat damunt l'esllavissada (situació número 3).

Entre la situació 1 on l'element exposat rep l'impacte del material desplaçat i la situació 3 on el terreny que es mou a sota de l'objecte exposat, s'ha decidit centrar l'estudi de la intensitat en la darrera ja que la primera situació presenta un caràcter ràpid de manera que la interacció amb l'element exposat és semblant a com ho fa una esllavissada de tipus fluida, com són els corrents d'arrossegalls. Per tant, una escala d'intensitat per a aquesta situació es faria de manera anàloga a com es farà la dels corrents d'arrossegalls. No obstant, amb això no s'està dient que per al cas de l'objecte que rep l'impacte d'una esllavissada s'hagi de mirar l'escala proposada per als corrents d'arrossegalls, ja que el valor de la velocitat entre una situació i l'altre és molt diferent, sinó que els descriptors associats serien la pressió d'impacte i la velocitat de l'esllavissada. Així doncs, tot i que el mètode i els descriptors de l'escala d'intensitat serien com els de l'escala d'intensitat dels corrents d'arrossegalls, els valors de velocitat serien diferents.

Per altra banda, tampoc es té en consideració la situació donada en l'escenari número 2 del punt 3.3.1 on els elements exposats es troben situats al damunt d'una massa que s'esllavissa ràpidament de manera que en perden la sustentació. En aquest cas es considera que, independentment de les condicions que es donin, els danys seran els majors possibles (col·lapse parcial o total de l'edifici de manera que s'ha d'abandonar o reconstruir de nou, o la no supervivència en el cas de les persones), és a dir, la vulnerabilitat dels objectes exposats serà 1 i el grau d'intensitat corresponent serà el més elevat.

En aquest escenari també es contemplen les esllavissades del tipus molt lentes (de 0.00 mm/any a 16 mm/any segons la classificació de (Cruden & Varnes, 1996)) encara que per a qualsevol situació donada els elements exposats només podran arribar a patir danys lleus, sent la seva vulnerabilitat molt baixa ($\ll 1$). A més, la situació seria la mateixa per al desplaçament acumulat: els danys als edificis serien lleus i es podrien anar reparant a mesura que s'anessin produint com són: danys en l'enguixat, esquerdes en parets, terres, al voltant de portes i finestres, esquerdes en les carreteres, etc.

Alguns exemples de casos reals on les condicions dels escenaris estudiats són equiparables a les de l'escenari aquí descrit apareixen en les següents referències: (Antronico et al., 2015; Cardinali et al., 2002; Cigna et al., 2013; Galli & Guzzetti, 2007; Petrucci & Gullà, 2010; Remondo et al., 2003; Tofani et al., 2014; Uzielli et al., 2015a).

4.2.2. Escenari 2 (despreniments rocosos)

El segon escenari està situat en una zona muntanyosa on les poblacions s'ubiquen al costat de parets verticals inestables els quals estan formats per material rocós altament fracturat. La combinació de la fracturació amb la meteorització genera el desprendiment o el bolcament puntual de blocs de roca pendent avall. Altres factors que afavoreixen aquest fenomen són l'activitat sísmica, els episodis de pluges intenses, la formació de gel entre les fractures afavorint-ne l'expansió i l'avanç de les mateixes, o l'activitat antròpica a l'hora d'excavar el terreny per a infraestructures o edificació.

El risc definit en aquest escenari, doncs, es tracta de caigudes puntuals de blocs de magnitud variable o masses rocoses de petites dimensions (despreniments fragmentaris) que arriben fins al peu del vessant, i fins i tot més enllà, de manera que acaben colpejant els elements exposats

que es troben a les zones properes al pendent, els quals són: edificis amb estructura de formigó armat, edificis de maçoneria (o pedra), infraestructures com carreteres, persones que estan a l'aire lliure i persones que es troben a dins dels edificis.

Per tant, aquest escenari es correspon amb el descrit en el punt 3.3.2, on es contempla la possibilitat de que es produeixi una caiguda de blocs individuals de forma puntual (situació 2). En el cas de la primera situació, on es desprèn una massa important de roca (despreniment de cornisa o allau de roques), es considera que la magnitud de l'esdeveniment dóna lloc a una energia cinètica considerable, fent que els elements exposats tinguin una vulnerabilitat pròxima a 1 o igual a 1. És per això que en aquest escenari la intensitat es considera màxima i també la vulnerabilitat dels elements exposats.

En l'escenari considerat, doncs, els objectes exposats es troben en una zona pròxima al vessant inestable que els fa susceptibles de ser colpejats per un o més blocs en moviments i, conseqüentment, el dany ve produït per l'impacte d'un bloc de roca contra els elements exposats.

Aquest escenari presenta la complexitat de la variabilitat de danys als elements exposats que pot provocar aquest tipus de fenomen. Pel que fa als edificis, els danys poden diferir molt en funció de la geometria de l'edifici i del punt d'impacte, entre d'altres factors. Un bon exemple d'això és el que mostren (Mavrouli & Corominas, 2010a; Mavrouli & Corominas, 2010b) en els respectius estudis on determinen els danys i la vulnerabilitat dels edificis amb estructura de formigó armat depenent del punt d'impacte del bloc sobre l'estructura.

Focalitzant ara amb les persones, els danys poden ser molt variables depenent de la magnitud del bloc i de la part del cos on es produeixi l'impacte (sense considerar l'alçada des d'on cau el bloc, de si troba obstacles pel camí, la distància recorreguda i l'energia dissipada, etc.). Així doncs, dos blocs de la mateixa magnitud poden provocar danys diferents si, per exemple, un topa contra el cap i l'altra topa contra una extremitat. El mateix passa si dos blocs de diferents magnituds colpegen la mateixa part del cos ja que, si, per exemple, un bloc d'uns 2 cm^3 al cap pot provocar una contusió més o menys important sense provocar la pèrdua humana, un bloc d'uns 10 cm^3 pot portar a la mort de la persona. Fins i tot, a diferència de les esllavissades, la vulnerabilitat de les persones situades a dins dels edificis pot ser major que la del propi edifici si el bloc després aconseguix foradar el mur i colpejar a una persona que es trobi en aquell punt de l'edifici. Si passés això, podria ser que l'edifici només patís un dany local (vulnerabilitat < 1) però si el bloc té l'energia suficient per entrar a l'interior d'aquest, la persona de ben segur que no sobreviurà sent així 1 la seva vulnerabilitat.

És per aquest motiu que per al cas de les persones que es troben dins dels edificis, l'escala d'intensitat proposada es farà assumint com a màxima la vulnerabilitat d'aquelles persones que no podrien arribar a escapar (gent amb mobilitat reduïda, gent discapacitada, gent que es troba dormint, etc.) i/o que ocupen l'edifici 18 hores o més, que és el 75-100% del dia (com podria ser el cas de persones que es dediquen a cuidar la llar, nens que encara no estan en període d'escolarització, gent gran, gent amb mobilitat reduïda, etc.). La raó d'això és que, per a aquests casos, es considera que la possibilitat de no patir danys greus és molt petita de manera que la seva vulnerabilitat associada seria 1.

Escenaris com el definit aquí es poden trobar a la realitat. Alguns exemples en són els que apareixen en les referències següents: (Agliardi et al., 2009; Blahut et al., 2013; Corominas et al., 2005; Dorren et al., 2004; Ferlisi et al., 2012; Guzzetti et al., 2003; Jaboyedoff et al., 2015; Petrucci & Gullà, 2009).

4.2.3. Escenari 3 (corrents d'arrossegalls)

El tercer escenari també es situa en una zona muntanyosa en la qual les poblacions es troben a prop dels vessants. En aquest cas, les característiques geològiques i geomorfològiques de les valls proporcionen unes condicions favorables a la descàrrega de material pendent avall quan els factors topogràfics ho permetin. És a dir, les àrees font dels corrents d'arrossegalls es situen a les parts altes dels vessants, allà on hi ha material disponible. Quan es produeix un període de pluges intenses, les pressions de l'aigua intersticial poden augmentar de tal manera que el sòl es pot trencar i aquest material disponible acaba sent transportat i descarregat al peu dels vessants i, fins i tot, més enllà.

Degut a les característiques fluides d'aquests fenòmens, la descàrrega del flux es produeix a altes velocitats generant fortes pressions d'impacte en els cossos que es troben dins de la seva trajectòria i permetent que la distància de recorregut sigui elevada, fent que la intensitat de l'esdeveniment es mantingui bastant alta tot i estar en zones distals respecte al vessant.

Es consideren els objectes exposats següents: edificis amb estructura de formigó armat, edificis de maçoneria (o de pedra), infraestructures com carreteres, persones que estan a l'aire lliure i persones que es troben a dins dels edificis. Aquests objectes, doncs, s'exposen a la possibilitat de ser impactats o atrapats per un corrent d'arrossegalls.

Aquesta situació es la mateixa descrita en el punt 3.3.3, on es presenten dues situacions possibles. En la primera l'objecte exposat es situa en el vessant, dins la trajectòria del flux, i en la segona l'element es situa dins del con de dejecció del corrent d'arrossegalls.

Tanmateix, a l'igual que passa amb els despreniments rocosos, els corrents d'arrossegalls també presenten una certa complexitat pel que fa a la vulnerabilitat dels edificis i a la vulnerabilitat de les persones situades a dins dels edificis.

Tal i com s'ha explicat en l'escenari 2, la geometria de l'edifici i la zona d'impacte del flux són dos factors clau que determinen el tipus de dany provocat i, pel que fa a les persones a dins d'edificis, la intensitat del fenomen pot provocar danys locals en un edifici com, per exemple, l'enderrocament de portes i finestres o de parets permetent que el corrent flueixi cap a dins del mateix amb una certa intensitat (vulnerabilitat inferior a 1) i, alhora, pot ser suficient com per no permetre la supervivència de les persones que s'hi troben en aquella zona de l'edifici en aquell moment, sent la vulnerabilitat d'aquestes igual a 1.

Per tant, anàlogament a l'escenari 2, per al cas de les persones que es troben dins dels edificis, l'escala d'intensitat proposada es farà considerant només aquelles persones que no podrien arribar a escapar i/o que ocupessin l'edifici 18 hores o més al dia, que representa el 75-100% del mateix, ja que es considera que la possibilitat de sobreviure és quasi bé nul·la, sent la seva vulnerabilitat igual a 1. En canvi, per la resta de persones seria baixa o negligible perquè podrien sortir de l'edifici evitant la catàstrofe.

Alguns exemples d'escenaris reals equivalents al descrit aquí es poden trobar en les referències següents: (Akbas et al., 2009; Cascini et al., 2014; Ferlisi et al., 2016; Hürlimann et al., 2008; Nefeslioglu & Gokceoglu, 2011; Papathoma-Köhle et al., 2007; Quan Luna et al., 2011).

4.3. Proposta d'escala de danys i rangs de vulnerabilitat dels elements exposats

El següent pas és trobar aquells valors de vulnerabilitat corresponents a cadascun dels nivells de possibles danys provocats pel fenomen. Per a fer-ho, s'ha realitzat una revisió bibliogràfica per veure quins han sigut els rangs de vulnerabilitat que s'han establert al llarg del temps, a més de l'escala de danys associada. Aquesta revisió és la base amb la que es construirà l'escala de danys amb els respectius rangs de vulnerabilitat.

És molt important parlar d'atenció en aquest punt perquè quan es porti a terme l'exercici de fer una escala d'intensitat global per als tres tipus de fenòmens estudiats, la qual presentarà uns rangs d'intensitat equiparables entre ells, es farà tenint en compte el grau de dany de cada nivell d'intensitat, és a dir, les definicions dels danys seran el punt d'annex de les diferents escales d'intensitat proposades.

4.3.1. Revisió bibliogràfica

Després de consultar la bibliografia referenciada en el punt 7, s'obtenen els resultats que es mostren en l'ANNEX IV. Com es pot veure, hi ha molta informació sobre els tipus de dany però no tanta sobre l'establiment de rangs de vulnerabilitat per a cada nivell de dany.

Començant per la definició dels danys, la informació trobada referent a edificis amb estructura de formigó armat i amb edificis de maçoneria i estructura de formigó és prou extensa i de qualitat ja que hi ha autors que en fan una descripció bastant detallada de cada un dels nivells com fan, per exemple, (Guillard-Goncalves et al., 2016b), (Fotopoulou & Pitilakis, 2013), (Sterlacchini et al., 2014), (Antronico et al., 2015) i (Mavrouli et al., 2014). No obstant, no passa el mateix quan es tracta de les infraestructures i les persones tant a dins com a fora dels edificis. Caldria fer més investigació en aquest sentit per cobrir la mancança d'informació detallada.

Pel que fa als nivells de vulnerabilitat, com ja s'ha dit abans, la informació és més escassa. Tot i així, més o menys els diferents autors donen valors similars. Això, a part de veure les referències citades en els articles consultats, fa pensar que potser la majoria d'ells s'han basat en propostes anteriors portant així a resultats similars. A part, s'observa que els valors mostren una certa linealitat com, per exemple, (Guillard-Goncalves et al., 2016b) els quals proposen els rangs següents: 0.00 – 0.20, 0.20 – 0.40, 0.40 – 0.60, 0.60 – 0.80, 0.80 – 1.00, o (Leone et al., 1996) els quals proposen aquests altres: 0.01 – 0.10, 0.20 – 0.30, 0.40 – 0.60, 0.70 – 0.80, 0.90 – 1.00. Aquest fet sobta una mica perquè pensant en el concepte de la vulnerabilitat, el qual es defineix resumidament com el grau de dany de l'element exposat, el dany no es produeix de forma tan progressiva. Un exemple ajudarà a entendre millor això.

En el cas de la vulnerabilitat dels edificis, aquesta tindrà valors baixos si els edificis tenen un grau de pèrdua baix i, en canvi, seran més elevats si els danys també ho són. Si comencem dient que el nivell més baix només presenta danys estètics i danys no estructurals lleus que es reparen ràpidament i a baix cost, que el dany moderat són danys no estructurals majors com la deformació de parets i esquerdes importants que requereixen de reparacions més complexes, que el següent nivell són danys estructurals menors com esquerdes obertes i generalitzades en l'estructura que depèn com poden portar al col·lapse parcial de l'edifici requerint la reconstrucció parcial del mateix i, finalment, que l'últim nivell són danys estructurals majors que porten al col·lapse parcial o al col·lapse total, entre el segon nivell i el tercer, els valors de vulnerabilitat haurien de mostrar un salt més pronunciat perquè tant les pèrdues (físiques i econòmiques) com el valor de la reparació o reconstrucció s'incrementen considerablement.

Tal i com es pot veure en les imatges següents, hi ha una gran diferència entre l'estat dels elements damnificats moderadament i altament. El salt tècnic i econòmic entre reparar un dany local i reparar o reconstruir part de l'objecte és significatiu.

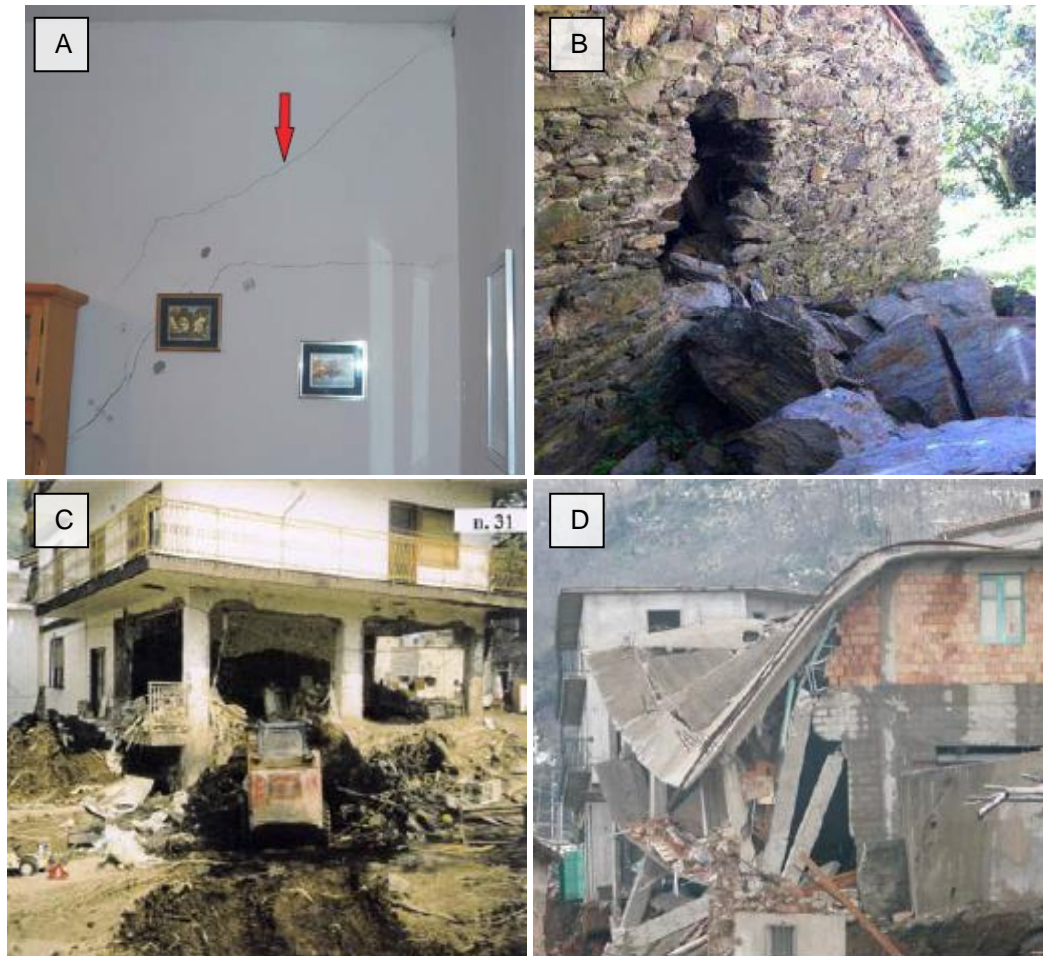


Figura 24. (A) Aparició d'esquerdes provocades per l'efecte d'una esclavissada. Grau de dany baix. **Font:** (Petrucchi & Gullà, 2009). (B) Ruptura local d'un mur d'una casa sense provocar dany estructural. Grau de dany moderat. **Font:** (Mavrouli et al., 2016). (C) Casa amb col·lapse total de la maçoneria però sense dany a l'estructura degut a un corrent d'arrossegalls. Grau de dany alt. **Font:** (Cascini et al., 2014). (D) Casa amb l'estructura parcialment col·lapsada degut a una esclavissada. Grau de dany molt elevat. **Font:** (Petrucchi & Gullà, 2009).



Figura 25. (A) Carretera afectada per un desprendiment rocós. Aquesta ha quedat parcialment obstruïda pels blocs caiguts de manera que caldran feines per retirar el blocs. No es veuen esquerdes produïdes per l'impacte. Grau de dany baix. **Font:** (Corominas et al., 2005). (B) Tram d'una carretera afectat per esquerdes obertes a més de veure's un petit enfonsament. Grau de dany moderat. **Font:** <http://katu.com/news/local/crack-in-road-from-landslide-lane-closed-for-weeks>. (C) Carretera amb esquerdes obertes i enfonsament parcial provocat per a una esllavissada. Grau de dany alt. **Font:** (Highland & Bobrowsky, 2008). (D) Carretera col·lapsada degut a una esllavissada. Grau de dany molt alt. **Font:** (Highland & Bobrowsky, 2008).

Així doncs, en els punts següents es poden veure les propostes de definició dels diferents graus de dany, i dels respectius valors de vulnerabilitat tenint en compte el que s'ha explicat en aquest mateix punt.

4.3.2. Proposta per a esllavissades

La proposta per al cas de les esllavissades és la següent:

Esllavissades - Edificis Formigó Armat		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.90 – 1.00	Molt alta	Col·lapse parcial o total per ruptura dels elements verticals degut a desplaçaments o assentaments excessius. Evacuació immediata. Reconstrucció necessària. Pot ser que la reconstrucció no sigui factible ni físicament ni econòmicament i s'hagi d'enderrocar l'edifici o, inclús, abandonar la zona.
0.45 – 0.90	Alta	Danys estructurals. Esquerdes generalitzades amb obertures importants de flexió o cisallament. Es pot produir el vinclament del reforç longitudinal de l'estructura. Requereix l'evacuació i reparacions majors.
0.05 – 0.45	Moderada	Danys no estructurals. Resistència de flexió dels elements assolida. Ductilitat desenvolupada fins al límit. Esquerdes que arriben al 1 mm d'obertura. Murs inclinats o desplaçats. Inici del despreniment del formigó i del revestiment. Reparacions no immediates.
0.005 – 0.05	Baixa	Danys estètics. Resposta elàstica lineal de l'estructura. Aparició d'esquerdes de flexió o cisallament amb una obertura inferior a 1 mm en parets, sostres i al voltant de marcs de portes i finestres. Portes i finestres inservibles.

Taula 3. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a edificis amb estructura de formigó armat afectats per esllavissades.

Esllavissades - Edificis de Maçoneria		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.80 – 1.00	Molt alta	L'assentament pot provocar la rotació o el gir del terreny i, conseqüentment, dels elements de l'estructura. Col·lapse total per ruptura dels elements verticals degut a desplaçaments o assentaments excessius. Evacuació immediata. Reconstrucció necessària. Pot ser que la reconstrucció no sigui factible ni físicament ni econòmicament i s'hagi d'enderrocar l'edifici o, inclús, abandonar la zona.
0.35 - 0.80	Alta	Danys estructurals que poden afectar l'estabilitat de l'edifici. Ruptura o col·lapse de la maçoneria, esquerdes generalitzades obertes i distorsió considerable de l'estructura. Possible col·lapse parcial de sostres i terres degut al desplaçament i a l'assentament. Requereix l'evacuació immediata i la reparació urgent.
0.05 – 0.35	Moderada	Danys no estructurals que requereixen reparacions complexes com esquerdes generalitzades i altament desenvolupades. Inclinacions, desplaçaments o col·lapses parcials de murs degut al desplaçament i a l'assentament sense comprometre l'estabilitat de l'estructura. Es requereix la reparació.
0.005 – 0.05	Baixa	Danys no significants que poden ser reparables fàcilment i a baix cost com el despreniment de l'enguixat, esquerdes sense obertura apreciable (< 1 mm), danys en portes i finestres. Reparacions no immediates.

Taula 4. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a edificis de maçoneria afectats per esllavissades.

Esllavissades – Infraestructures viàries		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.90 – 1.00	Molt alta	El desplaçament pot causar assentaments, aixecaments o girs en el terreny, els quals poden provocar esquerdes generalitzades i enfonsament de la carretera, així com desplaçament de la plataforma. Gran distorsió de la via de comunicació. Reconstrucció parcial o completa del tram afectat requerida, la qual pot implicar accions per reforçar el terreny i/o refer el traçat. Pot ser que la reconstrucció no sigui factible de manera que s'abandoni la infraestructura juntament amb la zona.
0.45 – 0.90	Alta	Esquerdament extens. L'assentament pot provocar esquerdes obertes i distorsió considerable en la infraestructura. També es poden veure afectats els talussos del tram de carretera implicat. Interrupció del trànsit durant dies o mesos. Reparacions urgents requerides.
0.20 – 0.45	Moderada	Esquerdes generalitzades. Necessitat de fer reparacions locals en menys d'un any. Interrupció del trànsit durant dies. Reparació necessària.
0.005 – 0.20	Baixa	Es comencen a generar esquerdes. Necessitat de reparar les esquerdes més desenvolupades una o dues vegades a l'any. Necessitat de tornar a pavimentar el tram de carretera un vegada cada 3 o 4 anys. No interrupció del trànsit.

Taula 5. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a infraestructures viàries afectades per esllavissades.

Esllavissades - Persones a l'aire lliure		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.95 – 1.00	Alta	No supervivència degut a una velocitat de moviment del sòl de més de 5 m/s o per un enfonsament important en la part on es troba la persona, o perquè l'esdeveniment és d'una magnitud tal que la persona no pot escapar corrent a un ritme constant durant un temps prolongat.
0.45 – 0.95	Moderada	Danys físics greus que requereixen l'hospitalització. La persona es veu afectada pel fenomen però aconsegueix sobreviure.
0.005 – 0.45	Baixa	Estats de xoc o danys físics lleus/moderats o que no requereixen l'hospitalització. La persona pot escapar bé.

Taula 6. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a persones que es troben a l'aire lliure afectades per esllavissades.

Esllavissades - Persones a dins d'edificis		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.80 – 1.00	Alta	Mort degut a que la intensitat de l'esdeveniment és tal que acaba provocant el col·lapse total de l'edifici o el col·lapse parcial de la part de l'edifici on s'hi troba la persona.
0.05 – 0.80	Moderada	Danys físics greus deguts que poden requerir l'hospitalització o no al col·lapsar alguna paret de l'edifici o del col·lapse de material de construcció, caiguda de mobles....
0.005 – 0.05	Baixa	Els danys dels edificis no són estructurals de manera que la persona pot fer vida normal sense perill però es pot lesionar per la caiguda de material de construcció o revestiment com contusions o rascades.

Taula 7. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per persones que es troben a dins dels edificis afectats per esllavissades.

4.3.3. Proposta per a desprendiments rocosos

En el cas dels desprendiments, la proposta és la següent:

Desprendiments rocosos - Edificis Formigó Armat		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.80 – 1.00	Molt alta	Col·lapse extensiu o total de l'edifici. El bloc impacta contra més d'una columna. Conseqüentment causa el col·lapse de bigues. Evacuació immediata i reconstrucció requerida. Podria ser que la reconstrucció no fos factible física ni econòmicament i s'hagués d'enderrocar.
0.35 – 0.80	Alta	Danys estructurals. Col·lapse parcial de l'edifici. El bloc impacta contra una columna i provoca la inestabilitat de l'estructura. Evacuació i reconstrucció necessària.
0.05 – 0.35	Moderada	Danys no estructurals. El bloc impacta contra un mur o impacta contra una columna però sense comprometre l'estabilitat de l'edifici. Destrucció del mur requerint la seva reconstrucció, o desplaçament/inclinació de la columna produint-li desperfectes com el desprendiment de formigó, el qual s'ha de reparar.
0.005 – 0.05	Baixa	Danys estètics. Esquerdes no obertes (< 1 mm), deformacions en els murs o danys en el revestiment degut a impactes contra murs. Portes i finestres inservibles. Reparacions no complexes requerides.

Taula 8. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a edificis amb estructura de formigó armat afectats per desprendiments rocosos.

Desprendiments rocosos - Edificis de Maçoneria		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.90 – 1.00	Molt alta	Col·lapse extensiu o total degut a un fort impacte. Reconstrucció no factible física o econòmicament.
0.75 – 0.90	Alta	Col·lapse parcial de l'edifici degut al fort impacte d'un bloc de gran magnitud. Evacuació i reconstrucció requerida.
0.15 – 0.75	Moderada	Danys no estructurals que requereixen reparacions complexes com esquerdes majors, ruptures, deformacions o inclinacions importants en murs. Es requereix l'evacuació i reparacions complexes.
0.005 – 0.15	Baixa	Danys no significants com esquerdes o petits bombaments en els murs, desprendiments del revestiment, danys en portes i finestres, etc. Reparacions no immediates.

Taula 9. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a edificis de maçoneria afectats per desprendiments rocosos.

Despreniments rocosos – Infraestructures viàries		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.90 – 1.00	Molt alta	Generació de craters i esquerdes degut al fort impacte d'un bloc, provocant la reconstrucció obligatòria de la zona afectada. Obstrucció parcial o total de la via de comunicació degut al desprendiment, el qual implica portar a terme feines dirigides a retirar el material després. També podria ser que s'haguessin de fer treballs d'estabilització en el vessant on s'ha produït el desprendiment. Interrupció parcial o total del trànsit.
0.45 – 0.90	Alta	Aparició d'esquerdes amb obertura visible o de petits craters degut a l'impacte del bloc. Interrupció parcial del trànsit i reconstrucció local requerida.
0.02 – 0.45	Moderada	Esquerdes i danys en les parts superficials de la infraestructura. Danys reparables amb la interrupció parcial del trànsit, és a dir, les accions de reparació es poden dur a terme sense tallar tots els carrils de la via.
0.005 – 0.02	Baixa	Danys lleus. Inspeccions, ajustaments, neteja i petites reparacions requerides sense interrupció del trànsit.

Taula 10. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a infraestructures viàries afectades per desprendiments rocosos.

Despreniments rocosos - Persones a l'aire lliure		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.80 – 1.00	Alta	Pèrdua de vida. La persona rep l'impacte directe d'un bloc de roca d'una certa magnitud i/o en una part del cos delicada com el cap o el tòrax.
0.10 – 0.80	Moderada	Danys físics greus que requereixen l'hospitalització. A la persona li arriba l'impacte d'un bloc però aconsegueix sobreviure.
0.005 – 0.10	Baixa	Danys físics lleus que no requereixen l'hospitalització com contusions o traus. La persona és colpejada per un bloc de magnitud petita i/o en una part del cos no delicada com són les extremitats.

Taula 11. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a persones que es troben a l'aire lliure afectades per desprendiments rocosos.

Despreniments rocosos - Persones a dins d'edificis		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.80 -1.00	Alta	No supervivència. Col·lapse total de l'edifici o col·lapse parcial de la part de l'edifici on s'hi troba la persona. També pot passar que el bloc aconsegueixi traspasar el mur i topi contra la persona que s'hi troba dins, just en aquella zona de l'edifici.
0.10 - 0.80	Moderada	Danys físics greus que requereixen l'hospitalització. El bloc aconsegueix arribar fins a la persona i colpejar-la però aquesta aconsegueix sobreviure. També es pot donar el cas en que la persona rebí l'impacte del material de construcció com a conseqüència de l'impacte del bloc contra l'edifici i la ruptura del mateix.
0.005 – 0.10	Baixa	Estats de xoc o danys físics lleus que no requereixen l'hospitalització com contusions o traus deguts a impactes menors directes dels blocs o del material de construcció després degut a l'impacte contra aquella part de l'edifici.

Taula 12. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a persones que es troben a dins dels edificis afectats per desprendiments rocosos.

4.3.4. Proposta per a corrents d'arrossegalls

I per últim, la proposta per als corrents d'arrossegalls és la següent:

Corrents arrossegalls - Edificis Formigó Armat		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.80 – 1.00	Molt alta	Col·lapse total de l'edifici degut a la forta pressió d'impacte rebuda. Evacuació de la zona i reconstrucció necessària. Pot ser que la reconstrucció no sigui factible física ni econòmicament fent que s'hagi d'enderrocar l'edifici.
0.35 – 0.80	Alta	Danys estructurals. Col·lapse parcial de l'estructura degut a la pressió d'impacte que li provoca el corrent d'arrossegalls. Evacuació i reconstrucció necessària.
0.10 – 0.35	Moderada	Danys estructurals menors. Esquerdes de flexió o cisallament en la majoria de bigues i columnes i despreniment de part del formigó o del revestiment. Reparacions complexes requerides.
0.005 – 0.10	Baixa	Danys no estructurals. Esquerdes de flexió o cisallament en algunes bigues i columnes a prop de les articulacions o dins d'aquestes. Portes i finestres inservibles. Danys estètics i danys en el mobiliari. Reparacions menors requerides.

Taula 13. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a edificis amb estructura de formigó armat afectats per corrents d'arrossegalls.

Corrents arrossegalls - Edificis Maçoneria		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.75 – 1.00	Molt alta	Danys severos que comprometen l'estabilitat de l'edifici. Col·lapse parcial o total requerint el desallotjament i la reconstrucció.
0.30 – 0.75	Alta	Danys estructurals que poden afectar l'estabilitat de l'edifici. Col·lapse parcial de murs, sostres i terres. Esquerdes severes o col·lapses de seccions de la estructura deguts a l'impacte. Requereix l'evacuació immediata. Reconstrucció parcial o total de l'edifici.
0.10 – 0.30	Moderada	Danys estructurals menors. Esquerdes de flexió o cisallament generalitzades tant en l'estructura com en els murs. Deformacions importants dels murs que poden provocar la ruptura local de la maçoneria. Despreniment del revestiment. Reparacions complexes requerides.
0.005 – 0.10	Baixa	Danys no estructurals. Esquerdes de flexió o cisallament al voltant de portes i finestres. Portes i finestres inservibles. Danys estètics i danys en el mobiliari. Reparacions menors requerides.

Taula 14. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a edificis de maçoneria afectats per corrents d'arrossegalls.

Corrents arrossegalls – Infraestructures viàries		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.75 – 0.10	Alta	Destrucció parcial o total per erosió del tram afectat degut a l'empenta del corrent d'arrossegalls i de l'arrossegament dels arrossegalls per la superfície. Obstrucció de la via de comunicació degut al material dipositat pel flux. Interrupció total del trànsit i reconstrucció requerida.
0.05 – 0.75	Moderada	Destrucció del ferm de la carretera degut a l'arrossegament dels arrossegalls per sobre la via. Obstrucció de la via de comunicació degut al material dipositat pel corrent d'arrossegalls. Interrupció total del trànsit, reparació del ferm de la carretera i feines per retirar el runam de la via.
0.005 – 0.05	Baixa	Danys lleus deguts al cobriment de la infraestructura pel corrent d'arrossegalls. Inspeccions, ajustaments, neteja i petites reparacions requerides amb o sense interrupció parcial del trànsit.

Taula 15. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a infraestructures viàries afectades per corrents d'arrossegalls.

Corrents arrossegalls - Persones a l'aire lliure		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.80 – 1.00	Alta	No supervivència. La persona es troba dins de la trajectòria de l'esdeveniment i és de magnitud suficientment gran i prou veloç com per no poder escapar.
0.20 – 0.80	Moderada	Danys físics greus que requereixen l'hospitalització. La persona es veu afectada pel fenomen però aconsegueix sobreviure.
0.005 – 0.20	Baixa	Estats de xoc o danys físics lleus que no requereixen l'hospitalització com contusions i talls superficials. La persona es veu involucrada en el fenomen però aconsegueix escapar pràcticament il·lesa.

Taula 16. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a persones que es troben a l'aire lliure afectades per corrents d'arrossegalls.

Corrents arrossegalls - Persones a dins d'edificis		
Vulnerabilitat	Escala de danys	
0.80 – 1.00	Alta	No supervivència. L'edifici col·lapsa parcialment o completament i cau sobre la persona o el flux aconsegueix penetrar dins l'edifici de tal manera que la persona queda atrapada.
0.20 – 0.80	Moderada	Danys físics greus que requereixen l'hospitalització. El flux aconsegueix entrar dins de l'edifici però la persona aconsegueix sobreviure.
0.005 – 0.20	Baixa	Estat de xoc o danys físics lleus que no requereixen l'hospitalització com contusions i talls superficials degut al desprendiment del material del revestiment o del material de construcció de l'estructura.

Taula 17. Proposta de rangs de vulnerabilitat i escala de danys per a persones que es troben a dins dels edificis afectats per corrents d'arrossegalls.

4.3.5. Discussió

Tal i com s'ha comentat en el punt 4.3.1, un dels objectius era no fer unes escales de vulnerabilitat tan lineals com les vistes en la bibliografia revisada. Així doncs, el criteri per posar aquest valor ha sigut com el que es mostra en l'exemple següent:

Si tenim un edifici de varies plantes amb estructura de formigó armat de 1.000.000 € afectat per una esllavissada, el valor de les pèrdues serà el següent depenent del grau de vulnerabilitat que es doni:

Dany molt alt: vulnerabilitat mitjana 0.95 -> valor pèrdua = $0.95 * 1.000.000 \text{ €} = 950.000 \text{ €}$

Dany alt: vulnerabilitat mitjana 0.675 -> valor pèrdua = $0.675 * 1.000.000 \text{ €} = 675.000 \text{ €}$

Dany moderat: vulnerabilitat mitjana 0.25 -> valor pèrdua = $0.25 * 1.000.000 \text{ €} = 250.000 \text{ €}$

Dany baix: vulnerabilitat mitjana 0.0275 -> valor pèrdua = $0.0275 * 1.000.000 \text{ €} = 27.500 \text{ €}$

Aquests valors de pèrdua es corresponen bastant amb el valor de les reparacions que s'haurien de portar a terme per reparar o reconstruir els danys descrits en les taules anteriors.

A part, els valors també s'han escollit tenint en compte les capacitats resistives dels elements. Per exemple, seguint amb el cas dels edificis afectats per esllavissades, els valors de vulnerabilitat dels edificis de maçoneria són menors que els edificis que incorporen formigó armat. Això es deu a que la maçoneria té una resistència als desplaçaments i als assentaments menor (Li et al., 2010; Uzielli et al., 2008). Segons les taules, els edificis de formigó armat col·lapsaran a partir del 90% del dany mentre que els de maçoneria ho faran a partir del 80%.

4.4. Proposta d'escales d'intensitat

Una vegada descrits els diferents nivells de dany i els respectius valors de vulnerabilitat toca buscar els valors d'intensitat que es corresponen a cada un d'aquests nivells, de manera que una intensitat baixa portarà associada una vulnerabilitat baixa i així successivament. Aquests valors d'intensitat tindran unitats diferents depenent del fenomen ja que cadascun dels tres aquí estudiats té els seus propis descriptors. Tanmateix, com ja s'ha anunciat en el punt 4.1, de la llista de descriptors proposada en el punt 3.5, aquí només es treballarà amb aquells dels quals es tingui alguna referència. Això es deu a que en aquest projecte no es fa cap test de resistència de materials ni similar, de manera que s'han de buscar valors en estudis fets al llarg de la història.

La metodologia a seguir, doncs, és fer una revisió bibliogràfica per veure quines escales d'intensitat s'han proposat fins ara o, si més no, quins valors llistats s'han comprovat en diferents estudis realitzats i publicats. Llavors, amb els resultats que s'obtinguin de la revisió, es proposa una escala d'intensitat amb la intenció de que sigui el més coherent possible i aplicable a la realitat, ja que un dels objectius d'aquest treball és presentar uns resultats que puguin ajudar, o donar peu a més recerca seguint aquesta direcció, als professionals del camp del risc d'esllavissades.

4.4.1. Revisió bibliogràfica

Una vegada feta la revisió bibliogràfica, les dades obtingudes es presenten en la Taula V. I i en la Taula V. II de l'ANNEX V. Tal i com es pot comprovar, la informació trobada és escassa. Això reflexa la necessitat de treballar en el tema de les intensitats perquè clarament sembla que hi

ha una mancança i que es podria aconseguir tenir més informació i desenvolupar molt més aquest àmbit, el qual afecta a moltes persones arreu del món cada any.

Una altra qüestió que determinen aquests resultats de la revisió és que en més d'un cas ha estat necessari guiar-se més per la lògica i pel raonament propi que no pas per resultats extrets d'altres estudis. Per tant, l'escala proposada tindrà una part de caràcter subjectiu. No obstant, cadascun dels resultats estaran raonats i justificats ja que no s'ha introduït cap valor de forma completament aleatòria o sense una explicació al darrere que el sustenti mínimament.

4.4.2. Proposta per a esllavissades

La proposta d'escala d'intensitat per a esllavissades és la que es mostra a la taula següent:

Escala d'intensitat - Esllavissades						
Intensitat		Edificis amb estructura de formigó armat (mm/s)	Edificis de maçoneria (mm/s)	Infraestructures viàries (mm/s)	Persones a l'aire lliure (mm/s)	Persones a dins d'edificis (mm/s)
4	Molt alta	0.50	0.30	0.000051	-	-
3	Alta	0.01	0.003	0.0000051	5000	0.3
2	Moderada	0.0005	0.0003	0.0000032	2000	0.003
1	Baixa	0.0000005	0.0000003	0.00000032	400	0.0003

Taula 18. Proposta d'escala d'intensitat per a esllavissades.

El raonament que hi ha al darrere d'aquests valors és el que s'explica a continuació:

En el cas dels edificis amb estructura de formigó armat la referència són dos valors que donen (Li et al., 2010). En el seu estudi determinen una intensitat de $5 \cdot 10^{-7}$ mm/s ($4.32 \cdot 10^{-3}$ cm/dia) per a un edifici que tingui vulnerabilitat 0 i una intensitat de $5 \cdot 10^{-1}$ mm/s (4320 cm/dia) per a un edifici amb vulnerabilitat igual a 1. S'han mantingut aquests dos valors ja que amb una esllavissada que es mogui a 0.5 mm/s, o més, no hi haurà edifici que ho aguanti, ja que són 1.80 m de desplaçament en una hora i 43.20 m desplaçats en un dia. El mateix passa amb els $5 \cdot 10^{-7}$ mm/s perquè impliquen un desplaçament de 0.04 mm en un dia, 0.3 mm en una setmana i, en el cas d'un desplaçament acumulat d'un any, serien 15.77 mm desplaçats (que es correspondria amb una esllavissada de tipus molt lent). Òbviament, aquesta velocitat no pot comportar més que danys menors tal i com es deia ja en el punt 4.2.1. En tot cas, es produiria algun dany si es mantinguessin durant períodes de temps molt prolongats. Pel que fa a la resta de nivells, s'han agafat de referència valors de desplaçament raonables al cap d'una hora, un dia, una setmana i un mes. Per exemple, per a una intensitat baixa, una velocitat de $5 \cdot 10^{-4}$ mm/s (4.32 cm/dia) implica un desplaçament setmanal acumulat de 30.2 cm, el qual és capaç de generar esquerdes que arribin al 1 mm d'obertura i la inclinació o desplaçaments de murs. En el cas de la intensitat alta, una velocitat de $1 \cdot 10^{-2}$ mm/s (86.4 cm/dia) comporta un desplaçament diari acumulat de 0.86 m, el qual és un valor capaç de provocar danys estructurals, com esquerdes generalitzades amb obertures importants o el vinclament de les bigues de l'estructura, tal i com s'indica en el punt 4.3.2. Si aquesta intensitat de moviment perdura en el temps durant varis dies, arribaria a acumular un desplaçament de varis metres en pocs dies, la qual cosa podria desencadenar un col·lapse parcial, o inclús total, de l'edifici.

Pel que fa als edificis de maçoneria, s'han considerat els valors proposats en el cas anterior i en el fet de que, tal i com es mostra a (Li et al., 2010) i a (Uzielli et al., 2008), els edificis de formigó armat tenen més resistència davant de les esllavissades que els de maçoneria. Això és prou obvi al tenir en compte que el formigó armat, a diferència de la maçoneria i el formigó

sense reforçar, presenta una certa flexibilitat al estar compostat per formigó, que aguanta bé en estats compressius, i d'acer, el qual resisteix bé a estats extensius. És per això, doncs, que s'han mantingut més o menys els mateixos ordres de magnitud però amb valors menors. A part, a l'igual que en el cas previ, s'han obtingut aquests valors mirant els seus valors de desplaçament acumulat, els quals són (en ordre d'intensitat ascendent): 9.4 mm/any, 2.59 cm/dia, 25.9 cm/dia i 1.08 m/h, respectivament. Aquests valors són capaços de provocar els danys descrits en el punt 4.3.2.

Centrant-nos ara en les infraestructures viàries, els valors es fonamenten en una escala proposada per (Mansour et al., 2011), la qual es basa en dades reals compilades arreu del món. Els autors donen els valors següents (en ordre d'intensitat ascendent): 10 mm/any ($3.2 \cdot 10^{-7}$ mm/s), 100 mm/any ($3.2 \cdot 10^{-6}$ mm/s), 160 mm/any ($5.1 \cdot 10^{-6}$ mm/s) i 1600 mm/any ($5.1 \cdot 10^{-5}$ mm/s). En l'estudi de (Mansour et al., 2011), aquestes dades inclouen el valor del moviment registrat i els danys observats en les infraestructures viàries en casos d'arreu del món.

Considerant ara les persones que es troben a l'aire lliure, també s'han escollit els dos valors donats per (Li et al., 2010), els quals proposen una velocitat de $5 \cdot 10^{-1}$ mm/s per aquells casos en que la vulnerabilitat és 0 i una velocitat de $5 \cdot 10^3$ mm/s per aquells elements amb vulnerabilitat igual a 1. Es considera correcte el valor de $5 \cdot 10^3$ mm/s (18 km/h) perquè és més o menys la velocitat mitjana establerta a la que corre una persona (20 km/h). No obstant, no es considera correcte l'altre valor, el qual suposa un desplaçament de 3 mm/h i 30 cm/dia ja que és massa baix. Llavors, el que s'ha agafat ha sigut un valor inferior a la velocitat mitjana establerta al caminar, la qual és de 5 km/h (1388.89 mm/s), ja que d'aquesta manera de ben segur qualsevol persona podria escapar també amb els danys definits en el punt 4.3.2. El valor resultant, doncs, ha sigut de 500 mm/s que són 1.8 km/h. Finalment, per decidir el valor per a una intensitat moderada, s'ha agafat com a referència la velocitat mitjana establerta a la que trota una persona, la qual és de 6 km/h (1666.67 mm/s), i s'ha incrementat fins als 2000 mm/s que són 7.2 km/h perquè gent amb unes característiques més vulnerables poden ser atrapades amb aquesta velocitat de desplaçament o patir lesions (per exemple, en caure per esquerdes obertes, etc).

Per últim, en el cas de les persones que es troben a dins dels edificis, la base ha estat definir els valors d'intensitat establerts en el cas d'edificis de maçoneria perquè són més vulnerables que els de formigó armat, buscar la situació més crítica i establir a continuació una escala de forma ascendent de la següent manera: els $3 \cdot 10^{-4}$ mm/s corresponents al nivell d'intensitat baix dels edificis de maçoneria, en el qual s'ha descrit com a dany provocat la possibilitat de col·lapse parcial del revestiment, el qual podria provocar contusions, rascades o lesions menors. Com a intensitat moderada s'ha proposat $3 \cdot 10^{-3}$ mm/s perquè és la velocitat a la que es poden generar danys estructurals amb possibles col·lapses de la maçoneria o col·lapses parcials de l'edifici i, aquesta caiguda de material pot ser la que pot ferir de consideració a les persones de l'interior. Finalment, s'ha establert una velocitat de 0.3 mm/s com a intensitat alta perquè és la que s'ha proposat per al grau de dany molt alt, el qual produeix col·lapses parcials o totals de l'edifici, de manera que comportaria l'atrapament, i fins i tot la mort, de les persones de l'interior segons l'escenari descrit en el 4.2.1.

4.4.3. Proposta per a desprendiments rocosos

La proposta d'escala d'intensitat per a desprendiments rocosos és la següent:

Escala d'intensitat – Despreniments rocosos						
Intensitat		Edificis amb estructura de formigó armat (kJ)	Edificis de maçoneria (kJ)	Infraestructures viàries (kJ)	Persones a l'aire lliure (kJ)	Persones a dins d'edificis (kJ)
4	Molt alta	28	35	4.9	-	-
3	Alta	14	20	1.0	0.4	28
2	Moderada	1.5	1.5	0.4	0.02	14
1	Baixa	1.2	1.2	0.05	0.005	1.5

Taula 19. Proposta d'escala d'intensitat per a despreniments rocosos.

En aquest altre cas, l'explicació per a la decisió d'aquests valors és la donada a continuació:

Pel que fa als edificis amb estructura de formigó armat, la base són les xifres que donen (Izatt et al., 2009) i (Mavrouli & Corominas, 2010b). Del primer s'han extret els valors de 28 kJ i 14 kJ per als nivells d'intensitat molt alta i alta respectivament. Del segon s'han extret els valors de 1.5 kJ i 1.2 kJ, els quals diuen que són els kJ necessaris per penetrar una llosa de formigó armat de 760 mm x 760 mm x 78 mm però sense perforar-a i els kJ necessaris per generar una marca i esquerdes radials en una llosa de les mateixes dimensions però sense armadura, respectivament. Els danys obtinguts per als autors s'ajusten als descrits en el punt 4.3.3.

En el cas dels edificis de maçoneria, el que s'ha fet ha sigut posar valors més elevats que els anteriors en els nivells que impliquen danys estructurals degut a que, davant de despreniments rocosos, els edificis de maçoneria presenten una millor resposta. Generalment, quan un bloc impacta contra un edifici de maçoneria, depenent de la magnitud, només provoca danys en el punt on impacta sense distorsionar l'estructura restant. Les estructures de formigó armat, en canvi, formen una xarxa estructural que l'impacte d'un bloc en un punt de la mateixa sí pot generar dany a tota una part de l'estructura o a l'estructura sencera (depenent també de la geometria d'aquesta). Pel que fa als valors dels danys no estructurals, s'han deixat els mateixos degut a que (Izatt et al., 2009) diuen que 1.5 kJ també són els necessaris per perforar una llosa de 760 mm x 760 mm x 78 mm feta només de formigó de manera que podrien perforar una paret de pedra, i el 1.2 kJ s'han posat per la mateixa raó que en el cas anterior (genera una marca i esquerdes radials en el formigó).

Pel que fa a les infraestructures viàries, no s'ha trobat cap dada a la bibliografia revisada. És per això que s'ha decidit treballar amb les energies cinètiques que apliquen els martells pneumàtics, els quals s'utilitzen per perforar l'asfalt. Investigant, s'ha trobat que el model Bobcat Drop Hammer és dels més potents que hi ha ja que perfora capes d'asfalt de 45 cm aplicant una energia cinètica de 4.9 kJ. Llavors, estan altres martells pneumàtics que treballen amb 1 kJ, les quals es necessita de més d'un impacte per trencar l'asfalt, de manera que encaixaria amb els danys alts, i les que treballen amb 0.4 kJ que encara necessiten més impactes per perforar-lo, encaixant amb els danys moderats. Finalment, s'ha seleccionat un valor més baix per tal que fos lògic amb els danys descrits com a lleus en el punt 4.3.3.

Considerant ara les persones que es troben a l'aire lliure, la determinació dels valors ha sigut molt difícil perquè costa molt trobar algun valor en la bibliografia amb el qual guiar-se. A més, tal i com s'apuntava en el punt 4.2.2, els danys (i per tant, la vulnerabilitat) poden ser molt variables depenent de la magnitud del bloc i de la part del cos on es produeixi l'impacte. El que s'ha fet, doncs és consultar estudis sobre els efectes dels impactes de bales i pilotes de goma sobre el cos humà. En un diuen que un impacte d'uns 400 J pot causar la mort a persones (Dhar et al., 2016) i en l'altre diuen que impactes de pilotes de goma de 23.98 J i de 49.77 J poden provocar danys greus allà on impacten, com la pèrdua d'un ull o danys greus en articulacions i ossos (Khonsari et al., 2010). És per això que s'ha proposat un valor de 0.4 kJ

per a una intensitat alta i un valor de 0.02 kJ per a una intensitat moderada. Finalment, s'ha decidit posar un valor bastant menor que pot provocar els danys descrits en el punt 4.3.3, el qual ha sigut 0.005 kJ.

Per últim, per al cas de les persones que estan dins dels edificis, s'han considerat els valors del tipus d'edifici més vulnerable, és a dir, dels edificis amb estructura de formigó armat. Per tant, s'ha escollit un valor de 28 kJ per a una intensitat alta, 14 kJ per a una intensitat moderada i 1.5 kJ per a una intensitat baixa. Aquesta última és la necessària per provocar caigudes del material de construcció que poden provocar contusions, rascades o traus. Els dos altres valors, si són capaços de fer penetrar els blocs a l'interior dels edificis, també seran capaços de provocar danys greus i molt greus a les persones que es trobin en aquell punt en el moment de l'impacte. A més, en el cas del col·lapse parcial o total de l'estructura, les persones poden quedar atrapades entre la runa.

4.4.4. Proposta per a corrents d'arrossegalls

La proposta d'escala d'intensitat per a corrents d'arrossegalls és la següent:

Escala d'intensitat – Corrents d'arrossegalls						
Intensitat	Edificis amb estructura de formigó armat (m)	Edificis de maçoneria (m)	Infraestructures viàries (m)	Persones a l'aire lliure (m)	Persones a dins d'edificis (m)	
4 Molt alta	3.0	2.5	-	-	-	
3 Alta	2.5	2.0	3.0	1.9	2.5	
2 Moderada	2.0	1.5	2.5	1.5	2.0	
1 Baixa	1.5	1.0	1.0	1.0	1.5	

Taula 20. Proposta d'escala d'intensitat per a corrents d'arrossegalls.

L'argument que justifica els valors proposats en aquest cas és el que s'explica tot seguit:

A diferència de les anteriors escales proposades, aquesta vegada primer s'explica el cas per a edificis de maçoneria. Els valors que hi apareixen coincideixen amb els valors que donen (Akbas et al., 2009). S'ha pensat en un edifici de 3 m d'alçada i que un flux amb una alçada de 2.5 m és capaç d'exercir una empenta a l'edifici suficient per provocar un col·lapse parcial o complet (tot i que dependria també de la seva velocitat), ja que quasi bé estaria fent força en un 75% de l'alçada de l'edifici. I el mateix passa amb els demés valors donats, els quals s'ajustarien bé als danys que he descrit en el punt 4.3.4.

Anant ara cap als edificis amb estructura de formigó armat, s'ha agafat de guia el valor de màxima intensitat que donen (Tsao et al., 2010), el qual són 3 m d'alçada de flux. Aquí s'ha fet el mateix raonament que en el cas anterior, si tenim un edifici de 3 m, tot i la resistència del formigó armat, un calat d'igual alçada que l'edifici seria capaç de provocar danys estructurals majors com el col·lapse parcial o total del mateix, tal i com comenten els autors. Pel que fa a la resta de valors, s'han incrementat una mica els proposats per als edificis de maçoneria, degut a que el formigó armat presenta una mínima flexibilitat en comparació amb els edificis de pedra o de maçoneria amb estructura de formigó sense reforçar.

Per una altra banda, el cas de les infraestructures viàries ha sigut el més complex a l'hora de decidir els valors proposats perquè no hi ha cap informació al respecte en la bibliografia revisada. Així doncs, després d'una recerca de fotografies i vídeos de casos reals de corrents d'arrossegalls s'ha pogut determinar la possible afectació a les infraestructures i s'han posat uns valors capaços de provocar els danys definits en el punt 4.3.4. A partir de les imatges,

doncs, s'ha observat que les carreteres no rebien grans impactes. En la majoria de casos es veien fluxos baixant pels vessants i passant per sobre l'asfalt. Els valors, doncs, s'han escollit veient que en corrents d'arrossegalls on l'alçada del flux era més a la de les persones que es veien que escapaven del mateix, no es veia que generessin danys sobre les carreteres, com a molt causaven la deposició de sediment i alguna marca a l'asfalt per l'arrossegament d'algun bloc de mida important i, per això, s'ha donat un valor de 1.0 m. Llavors, pensant en el cas extrem, i considerant que un flux amb una alçada de 3 m o més és capaç d'exercir una força contra la superfície de la carretera suficient com per provocar-li els danys descrits en el punt 4.3.4, s'ha proposat un valor de 3 m. Finalment, per als danys moderats s'ha buscat un valor entremig però que fos més proper al del nivell superior que a l'inferior per la mateixa raó de que, per les imatges i vídeos consultats, fluxos amb alçades similars a les de les persones no provocaven danys greus a les carreteres. Així doncs, el valor intermedi considerat és de 2.5 m, el qual és un valor més elevat que el de l'alçada d'una persona i inferior al valor màxim donat.

Pel que fa a les persones a l'aire lliure, el valor de referència ha estat el donat per (Sterlacchini et al., 2014), el qual és de 2.10 m. Els autors diuen que és el que es correspon amb el de no supervivència per a les persones. No obstant, fins i tot valors menors són capaços de provocar fatalitats i, és per això, que s'ha disminuït una mica fins als 1.90 m. Els altres valors s'han posat pensant en els danys descrits en el punt 4.3.4 i en una persona de 1.75 m d'alçada. Una alçada de flux de més de la meitat del que mesura la persona desplaçant-se a una certa velocitat, és capaç de provocar-li ferides importants, sobretot si aquest és arrossegat uns metres corrent avall. Finalment, s'ha considerat una alçada d'1 m com aquella que és capaç de provocar danys menors com contusions o rascades. Cal tenir en compte, però, que seria molt convenient que aquests valors anessin acompanyats també de valors de velocitat per determinar, de forma òptima, els danys potencials d'aquests fenòmens. Segurament, un flux d'un metre d'alçada combinat amb una velocitat de flux de 5-6 m/s podria arribar a ser letal o al revés. No obstant, degut a una mancança de dades en la bibliografia, no s'ha completat la taula amb velocitats.

Per últim, pensant en les persones que es troben a dins dels edificis, s'han agafat els valors proposats per al tipus d'edifici més vulnerable, que en aquest cas és el de maçoneria, tenint en compte que es corresponguessin amb els danys descrits en el punt 4.3.4. Així doncs, una intensitat alta, la qual implica la no supervivència de la persona al veure's afectada per l'impacte directe del flux o pel col·lapse parcial o total de l'estructura, s'ha proposat el mateix valor que en el cas dels edificis de maçonaria provoca danys estructurals severos en els mateixos, és a dir, 2.5 m. Així doncs, amb aquest valor l'edifici ja col·lapsaria provocant l'atrapament de la persona a l'interior o, en cas de no veure's afectada la persona pel col·lapse, la persona no podria sobreviure igualment degut a l'elevada alçada de flux. Per tal de que el flux colpegi directament a la persona, primer ha de ser capaç d'entrar a l'edifici ja sigui per infiltració per portes i finestres o enderrocant murs. En el cas d'una intensitat moderada, on la persona rep danys greus degut a la infiltració del flux en l'edifici, s'ha proposat el mateix valor que, per al cas dels edificis de maçoneria, provoca danys estructurals com el col·lapse de murs o de terres i sostres, els quals són els que permetrien una entrada d'aigua cap a l'interior de l'edifici arribant a afectar a les persones de l'interior, ja fos per l'impacte directe del flux com per l'impacte de material de construcció després. Finalment, s'ha proposat el valor de 1.50 m d'alçada de flux per a una intensitat baixa ja que aquest valor és el que provoca danys moderats en els edificis de maçoneria com són deformacions importants que poden comportar la ruptura local de la maçoneria o el desprendiment del revestiment i, conseqüentment, provocar contusions o rascades a les persones que s'hi troben dins i en reben l'impacte.

4.4.5. Proposta d'escala d'intensitat global

Una vegada arribat a aquest punt, doncs, és poden acoblar les tres escales proposades anteriorment en una sola. L'escala resultant és la següent:

Escala d'intensitat per a esllavissades, despreniments rocosos i corrents d'arrossegalls							
Intensitat			Edificis amb estructura de formigó armat	Edificis de maçoneria	Infraestructures	Persones a l'aire lliure	Persones a dins d'edificis
4	Molt alta	mm/s	$\geq 5 \cdot 10^{-1}$	$\geq 3 \cdot 10^{-1}$	$\geq 5.1 \cdot 10^{-5}$	-	-
		kJ	≥ 28	≥ 35	≥ 4.9	-	-
		m	≥ 3.0	≥ 2.5	-	-	-
3	Alta	mm/s	$1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-1}$	$5.1 \cdot 10^{-6} - 5.1 \cdot 10^{-5}$	$\geq 5 \cdot 10^3$	$\geq 3 \cdot 10^{-1}$
		kJ	14 - 28	20 - 35	1.0 - 4.9	≥ 0.4	≥ 28
		m	2.5 - 3.0	2.0 - 2.5	≥ 3.0	≥ 1.9	≥ 2.5
2	Moderada	mm/s	$5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-6} - 5.1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-1}$
		kJ	1.5 - 14	1.5 - 20	0.4 - 1.0	0.02 - 0.4	14 - 28
		m	2.0 - 2.5	1.5 - 2.0	2.5 - 3.0	1.5 - 1.9	2.0 - 2.5
1	Baixa	mm/s	$5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-7} - 3.2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$
		kJ	1.2 - 1.5	1.2 - 1.5	0.05 - 0.4	0.005 - 0.02	1.5 - 14
		m	1.5 - 2.0	1.0 - 1.5	1.0 - 2.5	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0
0	Negligible	m/s	$< 5 \cdot 10^{-7}$	$< 3 \cdot 10^{-7}$	$< 3.2 \cdot 10^{-7}$	$< 4 \cdot 10^2$	$< 3 \cdot 10^{-4}$
		kJ	< 1.2	< 1.2	< 0.05	< 0.005	< 1.5
		m	< 1.5	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.5

Taula 21. Proposta d'escala d'intensitat global per als tres fenòmens estudiats: esllavissades, despreniments rocosos i corrents d'arrossegalls.

4.4.6. Discussió

Fent l'escala d'intensitat global proposada doncs, s'estableixen unes equivalències entre fenòmens de manera que, siguin les unitats que siguin, es poden classificar en diferents nivells d'intensitat. A més, tal i com es pot veure en el punt 4.4.1, no s'ha trobat cap escala d'aquest estil en la bibliografia de manera que amb aquesta proposta s'aporta un punt de vista diferent als que s'han presentat fins ara.

A part, com ja s'ha dit anteriorment, alguns valors són més subjectius que d'altres i, tot i que es poden plantejar altres raonaments i maneres d'avaluar, entenem que s'ajusten prou bé als valors i danys que es donen a la realitat.

Tanmateix, amb aquest treball no es pretén establir una escala definitiva, sinó que la intenció és obrir camí cap a la creació d'una escala d'intensitat que pugui ser aplicable per a qualsevol cas que es doni arreu del món, és a dir, que sigui universal tal i com passa amb les escales de Mercalli o de Richter en el cas dels terratrèmols. No obstant, per a que compleixi aquest requisit, s'ha de disposar de moltes més dades de les que hi ha actualment, com ara més valors contrastats d'energia cinètica o de forces i pressions d'impacte, per exemple. Així doncs, aquesta proposta queda lluny de poder ser reconeguda i establerta universalment, però sí que és un granet de sorra més que contribueix en aquesta línia d'investigació.

Tornant ara a la introducció d'aquest capítol (punt 4.1), es proposava una sèrie d'escales d'intensitat amb uns descriptors concrets. Ara, veient la taula dels objectius (Taula 2) i la taula dels resultats (Taula 21), es pot observar que no s'han aconseguit totes les propostes inicials. Això es deu a que la informació trobada ha sigut poca i no ha estat possible fer una escala incorporant valors per a pressions d'impacte i velocitats de flux, ja que les dades obtingudes al respecte en la recopilació eren mínimes. Per tant, no s'han proposat valors sense cap tipus de recolzament al darrera per petit que fos i s'ha optat per no aportar dades que es poguessin allunyar molt de la realitat degut al desconeixement.

No obstant, sí és cert que en les escales proposades hi ha més d'un valor col·locat amb subjectivitat però sempre amb una lògica i un raonament al darrere que pot ser més o menys discutible. En canvi, en el cas d'haver presentat també els valors que falten, aquests haurien sigut completament subjectius i sense raonaments consistents que els acompanyessin, tal com s'apuntava abans. Així doncs, la decisió presa ha estat presentar uns valors que són menys dels proposats en un inici, però que com a mínim es poden defensar (encara que siguin més o menys qüestionables) perquè porten una justificació al darrere, abans que voler aportar més informació però essent aquesta no contrastada i poc fiable i, per tant, de menys qualitat.

4.5. Comparativa amb altres amenaces naturals

Tal i com s'ha anat apuntant en punts anteriors, a diferència de les esllavissades, hi ha altres riscos natural on s'han pogut establir unes escales d'intensitat que a més, en algun cas, s'han acceptat globalment. L'exemple més clar i conegut és l'escala de Mercalli i la de Richter per als terratrèmols, tot i que també s'han treballat escales d'intensitat per al cas dels tsunamis o de les allaus, entre d'altres.

4.5.1. Terratrèmols

L'escala d'intensitat que s'ha acabat estandarditzant universalment per als terratrèmols és l'escala de Mercalli (Figura VI. I de l'ANNEX VI). No obstant, tal i com s'ha vist en el punt 3.6.1, la intensitat en el cas dels terratrèmols equivaldria a la magnitud de les esllavissades i, la magnitud dels terratrèmols equivaldria a la intensitat de les esllavissades. És per això, que l'escala que s'hauria de comparar amb la proposada en aquest projecte seria la de Richter (Figura VI. II de l'ANNEX VI), que és la que contempla la magnitud dels terratrèmols.

L'escala de Richter, doncs, mesura els terratrèmols en termes d'energia alliberada. Aquesta, com que va des d'intensitats no perceptibles per a les persones fins a intensitats que arriben a la destrucció completa de poblacions senceres, es va fer de forma logarítmica (Henry et al., 1999). L'escala de Mercalli, en canvi, sí que incorpora els afectes del terratrèmol sobre els elements exposats. Tanmateix, actualment a Europa s'aplica l'Escala Macrosísmica Europea (Figura VI. III de l'ANNEX VI), la última actualització de la qual es va fer al 1998 i la qual es basa, originàriament, en l'escala de Mercalli (Molina et al., 2004). Aquestes escales, a l'igual que la proposada en aquest treball per a les esllavissades, expressen també el grau de dany esperable.

Per tant, l'escala aquí proposada té un aspecte semblant a la de Richter degut a que només es donen uns valors d'intensitat però, a diferència d'aquesta última, sí que està definida a partir dels efectes que provoquen els fenòmens sobre els elements, la qual cosa es comparable també a l'escala de Mercalli.

4.5.2. Tsunamis

En el cas dels tsunamis, es poden trobar diferents escales d'intensitat formulades al llarg de la història. Tal i com expliquen (Levin & Nosov, 2009), la primera proposta la va fer Sieberg al 1927, constava de 6 graus d'intensitat i no estava relacionada amb el mesurament dels paràmetres físics (descriptors) dels tsunamis, sinó que estava basada en els efectes macroscòpics que provocaven danys als elements exposats. Per altra banda, la última que s'ha reconegut és la de Papadopoulos-Imamura presentada al 2001. Aquesta està formada per 12 nivells d'intensitat i, a l'igual que passava amb la primera escala, també és qualitativa de manera que tampoc es basa en els descriptors del fenomen. A l'ANNEX VI es poden veure en què consisteixen les dues escales.

Aquestes escales doncs, a diferència de la proposada per a les esllavissades, només són qualitatives pel que manquen de valors numèrics dels descriptors d'intensitat. No obstant, tenen el punt en comú de que es basen en la capacitat de produir danys, de manera que per a aquest punt de vista l'escala d'intensitat d'esllavissada aquí presentada sí seria consistent amb les dels tsunamis.

4.5.3. Allaus

Per últim, en el cas de les allaus, també s'han establert escales d'intensitat. Tal i com explica (Rapin, 2002), existeixen diferents escales d'intensitat: l'escala americana del 1976 on es defineixen cinc nivells de forma bastant subjectiva, l'escala canadenca feta al 1993 la qual també estableix cinc nivells, i l'escala suïssa de l'any 2000, la qual és més complexa que les dues anteriors. Tant l'escala canadenca com la suïssa estan fetes a partir dels danys causats als elements exposats i també de valors físics del fenomen, de manera que serien comparables a la proposada en aquest projecte per a les esllavissades. A la Figura VI. IV de l'ANNEX VI es pot veure l'escala d'intensitat per a allaus suïssa.

4.5.4. Discussió

Una vegada observades les escales d'intensitat d'altres amenaces naturals, doncs, es pot veure que tant aquestes com la proposada en el present estudi per a esllavissades, tenen en consideració els danys esperables que produiran tots aquests fenòmens.

No obstant, un tret diferenciador entre la proposta d'escala d'intensitat per a esllavissades i les proposades per als altres riscos naturals, és que la primera porta uns rangs de vulnerabilitat associats que permeten una integració molt fàcil i pràctica de la intensitat a l'equació del risc. Per tant, aquesta presenta una avantatge sobre les demés ja que es pot quantificar i associar cada nivell d'intensitat a un valor de vulnerabilitat concedint la possibilitat de treballar immediatament amb la quantificació del risc a través de l'equació del mateix.

5. APLICACIÓ A CASOS REALS

5.1. Introducció

Arribats a aquest punt és interessant comprovar l'aplicació i el funcionament de les propostes de descriptors, dels graus de dany i rangs de vulnerabilitat, i de l'escala d'intensitat. Una bona manera de fer-ho és portant a terme una anàlisi quantitativa del risc ja que tots aquests paràmetres hi estan involucrats d'una manera o altra. En aquest capítol, doncs, es mostren dos exemples reals amb els quals es treballen els diferents factors i valors proposats.

La metodologia a seguir és seleccionar publicacions on es detallin esdeveniments passats per així extreure les dades exposades i tenir una base per fer les citades anàlisis. No obstant, tal i com ha succeït en els darrers capítols, caldrà veure si la informació disponible és amplia i de qualitat o si, en canvi, és escassa i poc útil, limitant el desenvolupament òptim de les anàlisis.

Les publicacions escollides són les de (Antronico et al., 2015) i (Quan Luna et al., 2014). En la primera, els autors fan una avaluació dels edificis de la població de Lungro, Itàlia, la qual s'ha vist històricament afectada per esllavissades lentes que, degut als desplaçaments acumulats produïts al llarg dels anys, han acabat afectant de manera més o menys greu als edificis locals. A part, es mostren també els desplaçaments mesurats durant cinc anys (des del 2006 fins al 2011) mitjançant inclinòmetres instal·lats per tota la població.

En la segona publicació, els autors realitzen una modelització de la propagació dels corrents d'arrossegalls succeïts als anys 1983, 2000 i 2003 a la població de Tresenda, Itàlia, per a continuació poder fer una anàlisi quantitativa del risc de corrents d'arrossegalls d'una zona susceptible de la localitat italiana. Aquí, els autors determinen uns rangs de vulnerabilitat i també fan una avaluació dels danys dels edificis de la població però, en aquest cas, ho fan a partir de la modelització dels corrents d'arrossegalls per a tres escenaris diferents definits a partir dels períodes de retorn de 10, 50 i 100 anys, respectivament.

Tot seguit es presenten detalladament les anàlisis quantitatives del risc realitzades per a cadascun dels casos seleccionats.

5.2. Exemple 1: Esllavissades de Lungro, Itàlia

5.2.1. Presentació

En el primer exemple es fa l'anàlisi quantitativa del risc d'esllavissada en la població de Lungro, situada al nord-oest de la regió de Calabria, al sud d'Itàlia. Les dades que serviran com a base d'aquest estudi s'extreuen de la publicació (Antronico et al., 2015), en la qual els autors fan un estudi de l'evolució dels danys als edificis de la població, els quals es veuen afectats per varies esllavissades de tipus lent i molt lent. Per a analitzar l'evolució, els autors mesuren el moviment del fenomen amb inclinòmetres durant el període de temps comprès entre els anys 2006 i 2011 i, a més, fan un reconeixement de l'estat de dany dels edificis a l'inici i al final d'aquest lapse de temps.

Així doncs, amb les dades recollides dels extensòmetres i les dades extretes del reconeixement dels edificis, es farà l'anàlisi quantitativa del risc de l'àrea presentada.

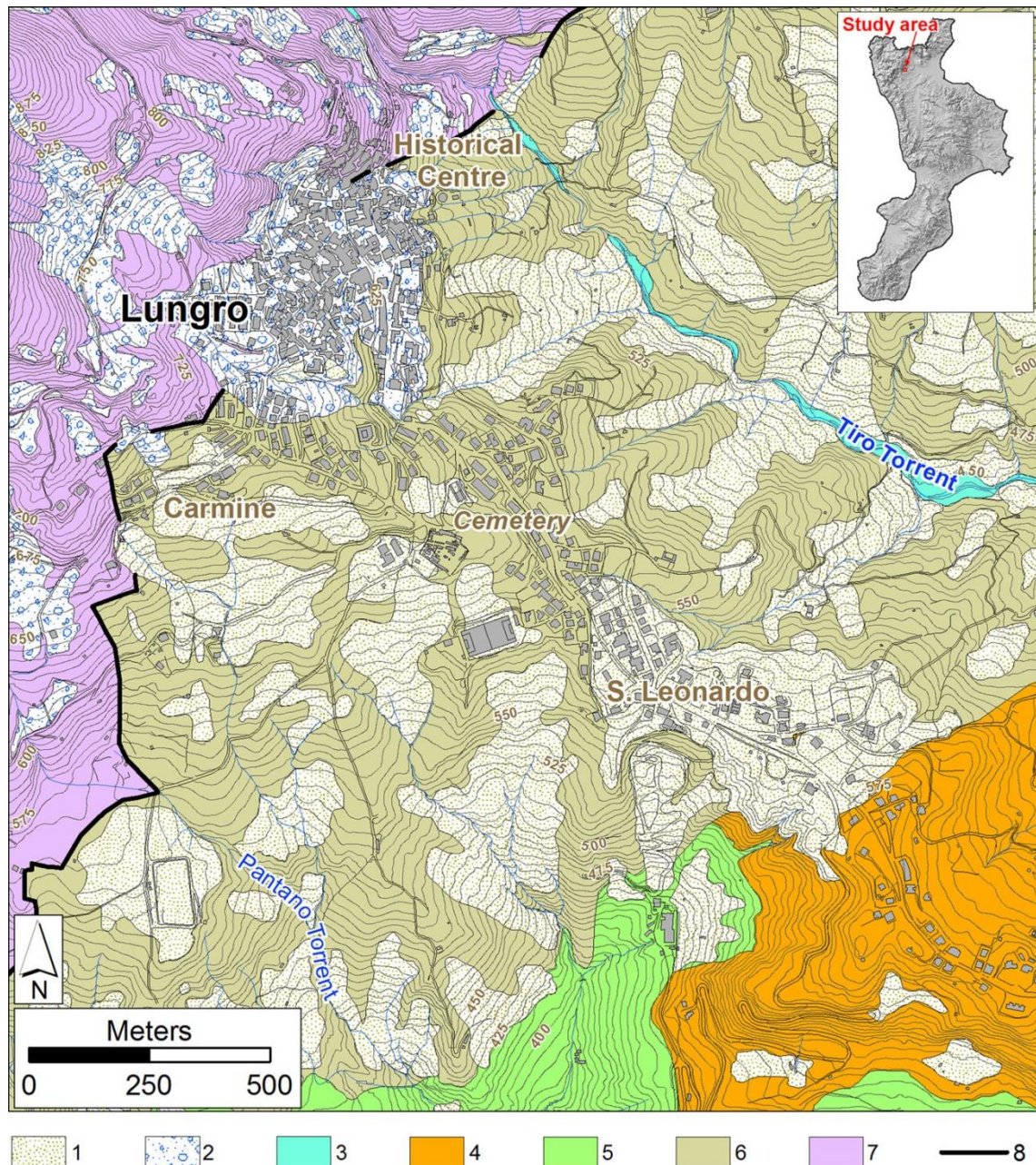


Figura 26. Mapa geològica de la zona de Lungro, Itàlia. **(1)** Cobertura col·luvial detrítica (Holocè). **(2)** Dipòsits de detritus carbonats (Holocè). **(3)** Dipòsits al·luvials (Holocè). **(4)** Successió Pliocè Mitjà-Pleistocè. **(5)** Successió Tortonià Mitjà-Messinià. **(6)** Unitat Diamante-Terranova (DTU) (Juràssic Inferior-Cretaci). **(7)** Unitat Lungro-Verbicaro (Anisià-Burdigalià Inferior). **(8)** Contacte tectònic. **Font:** (Antronico et al., 2015).

5.2.2. Zona d'anàlisi

Tal i com s'ha introduït en el punt anterior, la zona escollida per fer l'anàlisi quantitativa del risc és la que conforma la població de Lungro, al sud d'Itàlia. Aquesta població s'ha vist afectada al llarg del temps per esllavissades molt lentes (16 mm/anys – 1.60 m/any) i extremadament lentes (<16 mm/any), les quals han causat danys importants en alguns punts degut al desplaçament acumulat. La població es pot dividir en dues zones: el centre històric, el qual es data en la segona meitat del segle XV, i la zona urbana desenvolupada a la segona meitat del segle XX. Aquestes dues zones sumen un total de 5 km² i s'eleva entre els 400 i els 600 m sobre el mar.

Pel que fa a la geologia, la zona del nord-oest està composta per la unitat Lungro-Verbicaro (LVU) formada per metapelites i metacarbonats, mentre que bona part de l'àrea habitada de la població es troba sobre la unitat Diamante-Terranova (DTU), formada per fil·lites i pissarres. La unitat LVU es mou cap a la unitat DTU amb un contacte tectònic extensional. Tot això es pot veure en el mapa geològic de la zona mostrat en la Figura 26. Altrament, pel que fa a la morfologia, vessants pronunciats delimiten la part nord de la població mentre que la resta de la zona es caracteritza per una morfologia menys pronunciada formada per pendents suaus, els quals estan caracteritzats per una alta incidència d'esllavissades, de manera que s'evidencia el moviment recurrent del terreny (Antronico et al., 2015).

Els autors han classificat les esllavissades de la zona en quatre categories diferents, les quals es presenten en la Figura 27. A més, en la mateixa figura es pot veure la localització de cadascun dels inclinòmetres. Les categories s'han definit en funció de la litologia, el tipus d'esllavissada, la profunditat estimada en metres i l'àrea d'extensió en hectàrees. Aquestes dades no són rellevants per a fer l'anàlisi quantitativa del risc de manera que no es tindran en compte en el present estudi. Per a més informació el lector ha de consultar la publicació (Antronico et al., 2015).

Els valors mesurats durant el temps comprès entre els anys 2006 i 2011 pels inclinòmetres, els quals presenten els autors en la seva publicació, són els que es resumeixen en la Figura 22. A més, els autors també mostren una taula amb els resultats obtinguts a partir del seu estudi fet in situ sobre l'estat del dany dels edificis de la zona. Aquests darrers resultats es mostren a la Figura 23.

Zona	Inclinòmetre	cm/any		
		Mínim	Màxim	Mitjana
Centre històric	S01	0.13	2.50	0.68
	S16	0.10	1.55	0.54
	S19	0.48	4.97	1.99
	S20	0.03	1.88	0.72
	S21	0.17	1.62	0.64
	S22	0.05	0.35	0.18
Cementiri	S10	4.65	9.17	6.66
San Leonardo	S09	5.85	16.21	9.95
	F13	3.60	51.10	18.45

Taula 22. Resum de les dades preses amb els inclinòmetres. **Font:** (Antronico et al., 2015).

Nº d'edificis inspeccionats segons el grau de dany presentat							
Zona	Anys	Danys					
		Zero	Negligible	Baix	Moderat	Alta	Molt alt
Centre històric	2005	182	32	32	36	6	1
	2011	182	31	27	28	15	4
Cementiri	2005	10	3	2	2	2	0
	2011	10	0	5	1	1	2
San Leonardo	2005	1	3	1	1	2	2
	2011	1	1	1	2	1	4
Carmine	2005	20	5	3	3	0	0
	2011	20	5	2	1	3	0

Taula 23. Número d'edificis catalogats en funció del grau de dany presentat dividits per les diferents zones identificades de la població de Lungro. **Font:** (Antronico et al., 2015).

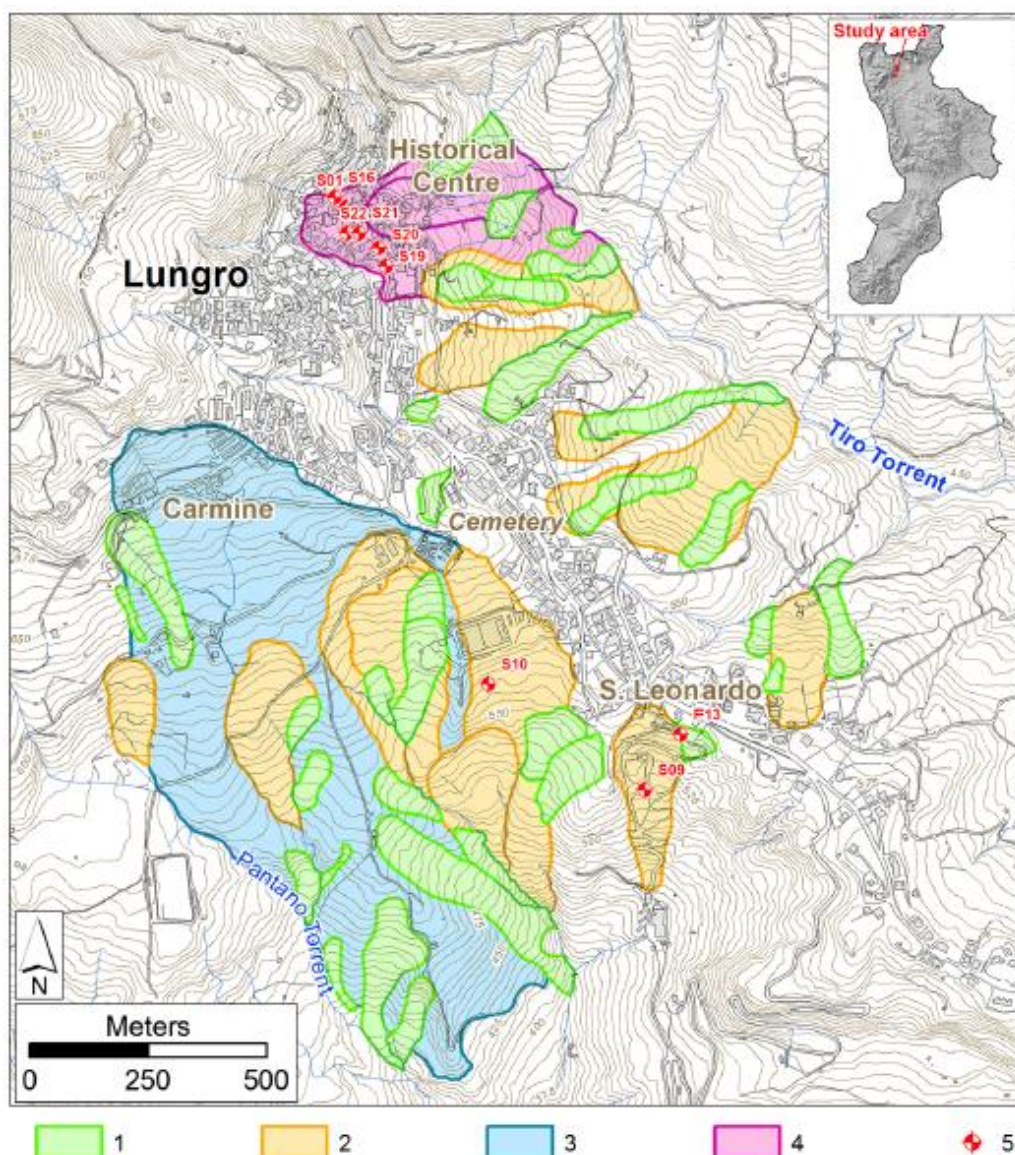


Figura 27. Mapa de la zona estudiada on s'han marcat les esllavissades en funció de cadascuna de les categories atorgades pels autors. A part, també es veuen els punts on es situen els inclinòmetres que mesuren els moviments del terreny. **(1)** Categoria A. **(2)** Categoria B. **(3)** Categoria C. **(4)** Categoria D. **Font:** (Antronico et al., 2015).

Una vegada s'han recollit aquestes dades, doncs, ja es pot fer l'anàlisi quantitativa del risc d'esllavissada de la població italiana de Lungro. No obstant, només es farà de les zones identificades com a centre històric, cementiri i San Leonardo, ja que són de les que s'han obtingut més dades.

5.2.3. Metodologia

Per fer l'anàlisi quantitativa del risc es començarà agafant les dades de velocitat donades pels inclinòmetres i se'ls hi atorgarà el nivell d'intensitat corresponent segons l'escala d'intensitat proposada en el punt 4.4.5. Seguidament, per a cada nivell d'intensitat s'assignarà el valor de vulnerabilitat pertinent en funció del que es marca a la taula proposada en el punt 4.3.2. Una vegada s'haurà fet això, finalment, es calcularà el risc d'esllavissada de la població de Lungro aplicant la fórmula del risc (equació [2]), la qual s'ha citat anteriorment en el punt 2.3.1. i es recorda a continuació:

$$R = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P(L)_j \times P(T|L)_{ij} \times P(I|T)_i \times V_{ij} \times W_i \quad [2]$$

On $P(L)_j$ és la probabilitat d'ocurrència d'una esllavissada amb una magnitud j ; $P(T|L)_{ij}$ és la probabilitat de que una porció de l'esllavissada amb un volum j afecti a un element de risc i ; $P(I|T)_i$ és la probabilitat de que un element de risc donat es trobi situat dins la zona d'abast de l'esllavissada en el moment precís en que es produeixi el fenomen; V_{ij} és la vulnerabilitat que presenta l'element exposat i a rebre l'impacte d'una esllavissada amb un volum j ; i W_i és el valor econòmic de l'element de risc i .

5.2.4. Limitacions

La metodologia a seguir és clara i bastant senzilla. No obstant, obtenir uns bons resultats resulta complicat quan no es tenen totes les dades que caldrien i això és el que passa en aquest exemple. En aquest cas no es pot determinar l'exposició de cada edifici individualment perquè es desconeixen les ubicacions dels mateixos, així com la seva posició relativa respecte l'esllavissada.

A part, tal i com expliquen els autors, la vulnerabilitat i l'avaluació dels danys es basa en observacions al camp, de manera que ells no consideren altres factors com el tipus d'edifici, l'edat, la mida, o el tipus de fonamentacions de cadascun d'ells, per exemple. Precisament, els factors que influeixen en el grau de dany són: el tipus, la localització i la magnitud del moviment, el tipus, l'edat i el tipus de fonamentacions de cada edifici, així com la posició relativa de l'edifici respecte el cos de l'esllavissada (Antronico et al., 2015). Per tant, al no disposar de tota aquesta informació, alguns valors de l'equació del risc seran hipotètics, de manera que els resultats presentats en aquest estudi portaran incerteses associades. Les hipòtesis són les següents:

- S'aplicarà $P(T|L)_{ij} = 1$ degut a que es treballarà només amb els valors dels edificis damnificats de manera que es pressuposa que tots els moviments afecten a tots els edificis amb els que es treballaran.
- S'aplicarà $P(I|T)_i = 1$ perquè, anàlogament a la hipòtesi anterior, s'assumeix que tots els elements exposats treballats aquí estan situats dins de la zona d'abast del fenomen.
- S'aplicarà una xifra de 260.000 € com a valor de cadascun dels edificis considerats degut a que es desconeixen els valors econòmics reals de cadascun dels edificis de la població. S'ha escollit aquesta xifra perquè segons (Quan Luna et al., 2014), és el valor mitjà dels edificis de maçoneria amb estructura de formigó de la població italiana de Tresenda. A més, es considera el mateix valor tant per a edificis de maçoneria com per a edificis de formigó armat després de veure que (Zêzere et al., 2008) atorga el mateix valor econòmic a edificis de maçoneria i a edificis de formigó armat de Lisboa.

Una altra limitació és el número d'inclinòmetres instal·lats. Tal i com es pot veure a la Figura 22, la zona que presenta un major desplaçament és la del cementiri que, alhora, és la zona on hi ha menys inclinòmetres ja que només n'hi ha un. Això repercuteix en l'anàlisi quantitativa del risc, concretament en el moment d'assignar els valors de vulnerabilitat, ja que s'assumirà que tots els edificis de la zona del cementiri tenen el mateix valor de vulnerabilitat degut a que només es té un sol valor de velocitat per a aquesta zona. Aquest fet, doncs, també aportarà incerteses als resultats.

5.2.5. Anàlisi quantitativa del risc i resultats

Tal i com s'ha explicat en el punt 5.2.3, el primer pas és determinar el nivell d'intensitat dels moviments mesurats i assignar la vulnerabilitat corresponent a cada un dels nivells segons els valors proposats en els punts 4.4.5 i 4.3.2. Com que a l'estudi publicat es fa el seguiment de les esllavissades durant cinc anys (des del 2006 fins als 2011), es tindrà en compte el desplaçament mitjà acumulat durant aquest període, ja que aquest factor és el que determina els danys en esllavissades lentes. És per això, que els valors dels inclinòmetres es multiplicaran per cinc. Els resultats d'aquest primer pas es mostren a la Figura 25.

A continuació, es passa a fer l'anàlisi quantitativa del risc de la població. Cada un dels valors dels components de la fórmula del risc s'han assignat de la manera següent:

- S'ha aplicat un valor de $P(L)_j = 1$ degut a que els mesuraments s'han fet durant cinc anys i, en aquests cinc anys, els moviments del terreny han estat actius, de manera que s'assumeix que l'esllavissada ha estat succeint durant tot el període de temps analitzat.
- S'ha aplicat un valor de $P(T|L)_{ij} = 1$ i $P(I|T)_i = 1$ tal i com s'ha raonat en el punt 5.2.4 on s'expliquen les limitacions del present l'anàlisi.
- S'han aplicat els valors de V_{ij} segons la proposta de valors de vulnerabilitat proposada en aquest treball per a edificis de maçoneria, en el cas dels edificis del centre històric, i els valors de vulnerabilitat proposats per a edificis de formigó armat per als edificis de la zona del cementiri i de San Leonardo. Aquesta diferenciació es deu a la informació aportada per (Antronico et al., 2015).
- Els valors de W_i s'han calculat a partir de la vulnerabilitat dels edificis afectats i el nombre d'edificis afectats per a aquella vulnerabilitat donada, tal i com es mostra a la Figura 24.
- En el cas del centre històric, per a la vulnerabilitat de 0.003 s'han considerat els edificis tipificats amb un grau de dany negligible i baix (58 edificis en total al 2011), per a la vulnerabilitat de 0.005 s'han considerat els edificis tipificats amb un grau de dany moderat i alt (43 edificis en total al 2011) i, finalment, per a la vulnerabilitat de 0.02 s'han considerat els edificis tipificats amb un dany molt alt (4 edificis al 2011).

Càlcul de W_i					
Zona	V_{ij}	Grau de dany	Nº edificis al 2011	W_i edifici	W_i
Centre històric	0.003	Negligible	58	260000 €	15080000 €
		Baix			
	0.005	Moderat	43		11180000 €
		Alt			
	0.02	Molt alt	4		1040000 €
Cementiri	0.035	Negligible/ Molt alt	9	260000 €	2340000 €
San Leonardo	0.035	Negligible/ Molt alt	9	260000 €	2340000 €

Taula 24. Resum dels valors agafats per a l'obtenció de W_i .

Dades de la publicació					Nivells d'intensitat			Vulnerabilitat		
Zona	Inclinòmetre	mm/any * 5 anys			mm/s * 5 anys					
		Mínim	Màxim	Mitjana	Mínim	Màxim	Mitjana	Mínim	Màxim	Mitjana
Centre històric	S01	6.5	125	34	$2.06 \cdot 10^{-7}$	$3.96 \cdot 10^{-6}$	$1.08 \cdot 10^{-6}$	0.003	0.02	0.02
	S16	5	77.5	27	$1.59 \cdot 10^{-7}$	$2.46 \cdot 10^{-6}$	$8.56 \cdot 10^{-7}$	0.003	0.02	0.005
	S19	24	248.5	99.5	$7.61 \cdot 10^{-7}$	$7.88 \cdot 10^{-6}$	$3.16 \cdot 10^{-6}$	0.005	0.02	0.02
	S20	1.5	94	36	$4.76 \cdot 10^{-8}$	$2.98 \cdot 10^{-6}$	$1.14 \cdot 10^{-6}$	0.001	0.02	0.02
	S21	8.5	81	32	$2.70 \cdot 10^{-7}$	$2.57 \cdot 10^{-6}$	$1.01 \cdot 10^{-6}$	0.003	0.02	0.02
	S22	2.5	17.5	9	$7.93 \cdot 10^{-8}$	$5.55 \cdot 10^{-7}$	$2.85 \cdot 10^{-7}$	0.001	0.005	0.003
Cementiri	S10	232.5	458.5	333	$7.37 \cdot 10^{-6}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$	$1.06 \cdot 10^{-5}$	0.02	0.035	0.045
San Leonardo	S09	292.5	810.5	497.5	$9.28 \cdot 10^{-6}$	$2.57 \cdot 10^{-5}$	$1.58 \cdot 10^{-5}$	0.02	0.035	0.035
	F13	180	2555	922.5	$5.71 \cdot 10^{-6}$	$8.10 \cdot 10^{-5}$	$2.93 \cdot 10^{-5}$	0.02	0.035	0.035

Intensitat negligible
 Intensitat baixa
 Intensitat moderada
 Intensitat alta
 Intensitat molt alta

Taula 25. Resum dels resultats d'intensitat i de vulnerabilitat a partir de les dades extretes de (Antronico et al., 2015) i els nivells d'intensitat i els valors de vulnerabilitat proposats ens aquest treball en els punts anteriors.

Anàlisi Quantitativa del Risc d'esllavissada a Lungro, Itàlia									
Zona	$P(L)_j$	$P(T L)_{ij}$	$P(I T)_i$	V_{ij}	W_i	R	R anual	R anual / edifici	R anual total
Centre històric	1	1	1	0.003	15.080.000 €	45.240 €	9.048 €	156 €	61.828 €
				0.005	11.180.000 €	55.900 €	11.180 €	203 €	
				0.02	1.040.000 €	20.800 €	4.160 €	1.040 €	
Cementiri	1	1	1	0.045	2.340.000 €	105.300 €	21.060 €	2.340 €	
San Leonardo	1	1	1	0.035	2.340.000 €	81.900 €	16.380 €	1.820 €	

Taula 26. Resum dels resultats de l'anàlisi quantitativa del risc d'esllavissada per als edificis de la població de Lungro.

5.2.6. Discussió

Una vegada obtinguts els resultats es pot comprovar que, efectivament, el grau d'incertesa és inversament proporcional al nombre de dades de partida. Així, mentre es poden observar uns resultats raonables en la zona del centre històric, no passa el mateix amb els resultats de la zona del cementiri i de San Leonardo. Els dos darrers valors resulten molt elevats i són massa generalistes. És a dir, en la zona del centre històric, degut al major nombre d'inclinòmetres s'han obtingut dades més precises en funció de cada desplaçament ja que no es produeix un moviment uniforme al llarg de tota la població. Per tant, el que diuen els resultats de la zona del cementiri i de San Leonardo és que tots els edificis que es troben afectats ho estan de la mateixa manera quan, normalment, a la realitat no passa això sinó que succeeix una situació com la que s'ha obtingut en la zona del centre històric.

Per altra banda, al fer aquest anàlisi s'ha vist que el grau de dany atorgat pel autors mai seria assolit si es mira la proposta feta en el punt 4.3.2. És a dir, segons la proposta d'escala de danys i de rangs de vulnerabilitat feta en aquest estudi, en cap cas seria possible tenir una esllavissada molt lenta i un grau de dany destructiu, sinó que per a les intensitats donades no es passaria d'un grau de dany baix. No obstant, el que passa en l'avaluació feta per (Antronico et al., 2015) és que analitzen edificis que s'han vist afectats per les esllavissades durant molt de temps, de manera que els danys resultants són molt elevats. Per tant, cal tenir en compte que, tot i que l'anàlisi quantitativa del risc s'ha fet considerant un període de temps de cinc anys, els danys associats als edificis són fruit de molts anys de patir moviments en el terreny, i no pas com a resultat dels moviments dels cinc anys avaluats.

Així doncs, hauria sigut més convenient fer una avaluació de l'increment del dany en els cinc anys estudiats. D'aquesta manera, el cost anual per edifici en cinc anys s'adequaria més a la realitat i seria menor que el que s'ha obtingut en aquesta anàlisi del risc. Per a fer això, però, cal conèixer les dades exactes de cadascun dels edificis, cosa que no ha sigut el cas.

5.3. Exemple 2: Corrent d'arrossegalls de Tresenda, Itàlia

5.3.1. Presentació

En el segon exemple es realitza l'anàlisi quantitativa del risc de corrents d'arrossegalls en la població italiana de Tresenda, ubicada al municipi de Teglio, el qual es troba a la vall de Valtellina, una vall situada a la part central dels Alps. Les dades bàsiques per fer l'anàlisi s'extreuen de la publicació (Quan Luna et al., 2014), en la qual els autors fan una anàlisi quantitativa del risc de la zona a partir de les dades obtingudes després de fer una modelització de la propagació dels corrents d'arrossegalls.

Tresenda es va veure afectada per tres grans esdeveniments succeïts al 1983, al 2000 i al 2003. La modelització d'aquests successos portada a terme pels autors amb el model numèric FLO-2D permet obtenir dades físiques dels fenòmens com l'extensió, l'alçada del flux, la velocitat, les pressions d'impacte, etc., així com determinar quins elements exposats es veuran afectats per possibles futurs fluxos. Amb aquesta informació, doncs, és possible calcular les vulnerabilitats i els nivells de risc de la zona.

Per tant, amb les dades aconseguïdes a partir de la modelització dels tres escenaris presentats pels autors, les quals són el número total d'elements exposats damnificats en funció del seu grau de dany, es farà l'anàlisi quantitativa del risc de l'àrea presentada.

5.3.2. Zona d'anàlisi

Tal i com s'ha explicat en el punt anterior, la zona seleccionada per fer l'anàlisi quantitativa del risc és la que es situa a la població de Tresenda, al nord d'Itàlia, una població ubicada en una vall de la part central dels Alps, de manera que és fàcil imaginar la seva morfologia abrupta.

La vall de Valtellina és una vall en forma de U degut a l'activitat glacial del Quaternari, on a la seva part més baixa es troba el traçat del riu Ada. Els vessants estan coberts de sediments col·luvials i glacials de gruix variable, els quals són favorables a la iniciació de corrents d'arrossegalls. A part, a la cara sud dels vessants s'observen terraces d'origen antròpic construïdes mitjançant murs de pedra, les quals es van fer per a la viticultura. Aquestes terraces van estar subjectes a varis col·lapses en el passat degut a l'augment del nivell freàtic després de pluges intenses provocant, conseqüentment, corrents d'arrossegalls que van provocar danys considerables a la població.

Efectivament, doncs, aquesta població s'ha vist afectada per l'aparició de corrents d'arrossegalls al llarg de la història. Concretament, han sigut tres els esdeveniments més importants que es recorden, els quals van ocórrer al 1983, al 2000 i al 2003, sent el primer el més destructiu de tots. Tal i com expliquen en la publicació, les intenses pluges del maig del 1983 van desencadenar més de 200 esllavissades i corrents d'arrossegalls a la vall de Valtellina. A la població de Tresenda es van registrar 14 morts i bastants edificis destruïts. A més, la carretera nacional S.S.38 va quedar bloquejada, aïllant la part septentrional de la vall durant varis dies.

Tots tres successos van ser desencadenats per l'acumulació de grans quantitats d'aigua precipitada a sobre de la zona durant els dies anteriors als fets. Per tant, el factor desencadenant principal sempre han sigut les pluges intenses prèvies als esdeveniments. Això, sumat a la morfologia i geologia de l'àrea on es situa Tresenda, crea un escenari perfecte per a la generació de corrents d'arrossegalls.



Figura 28. Fotografies de dos corrents d'arrossegalls succeïts al 22 i 23 de maig de 1983 a Tresenda.
Font: (Quan Luna et al., 2014).

(Quan Luna et al., 2014) utilitzen dades d'estudis anteriors per investigar l'entorn i la història de la zona pel que fa a l'activitat dels corrents d'arrossegalls, per així detectar les àrees potencials i modelitzar-les per preveure la seva propagació. Els resultats obtinguts els utilitzen conjuntament amb informació referent als elements exposats per tal de fer una quantificació dels danys en edificis i persones per als tres períodes de retorn escollits (10, 50 i 100 anys), és a dir, per fer una anàlisi quantitativa del risc dels corrents d'arrossegalls potencials.

El resultat de la investigació és un total de tres àrees font potencials. Aquestes són les que es modelitzen i s'avaluen (Figura 29). També fan una validació del model agafant com a dades de referència les dels esdeveniments succeïts als anys 1983, 2000 i 2003 (Figura 30).

Pel que fa als elements exposats, els autors identifiquen un total de 111 edificis a la població de Tresenda, 57 dels quals es troben dins de la zona potencial estudiada. La majoria són edificis amb estructura de formigó armat i murs de maçoneria d'entre dues i tres plantes. El valor de cadascun d'ells el determinen a partir dels preus de construcció donats per l'associació d'enginyers i arquitectes de Milà, els quals assignen un cost de 801 €/m² per a aquest tipus d'edificació. D'aquesta manera, els autors determinen que el valor total dels edificis exposats és de 14.9 milions d'euros, sent d'1.1 milions d'euros les xifres més elevades i de 0.034 milions d'euros les més baixes. El preu mitjà per edifici, finalment, és de 0.26 milions d'euros.

Per altra banda, en referència a les persones, els autors van consultar les bases de dades del registre per tal de determinar el número de persones que viuen a la zona potencial, el qual va resultar ser de 173.

A part d'això, a la zona d'estudi també s'hi inclou un tram de la carretera nacional S.S.38, a més d'altres trams de carreteres secundàries i de la via de tren.

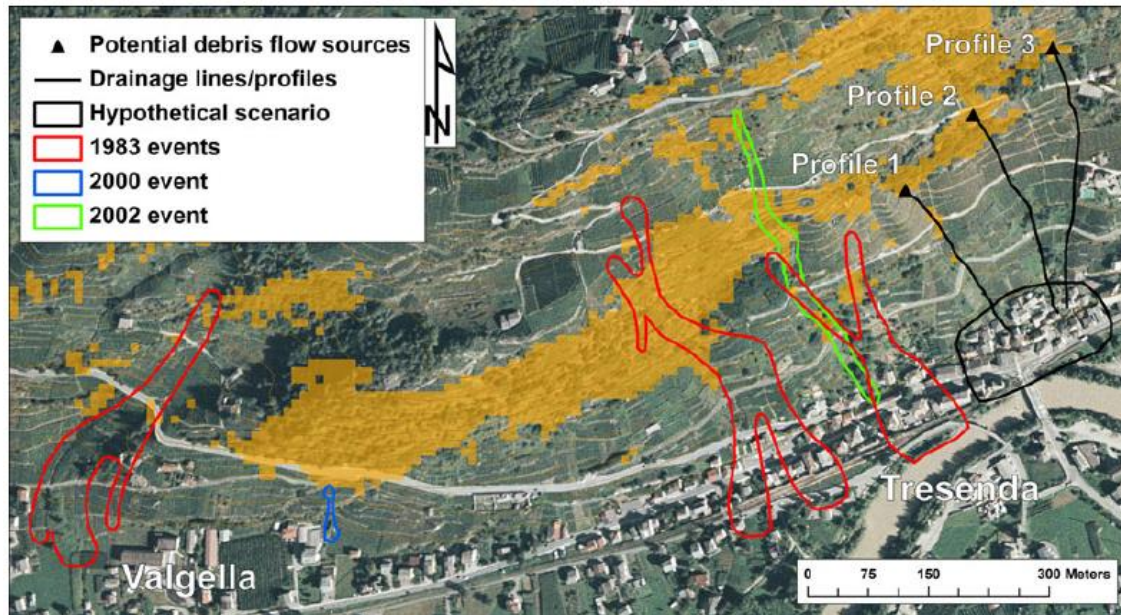


Figura 29. Imatge on s'han delimitat els esdeveniments de 1983, 200 i 2002. Les zones ombrejades amb color taronja indiquen àrees alta i molt altament susceptibles a iniciar corrents d'arrossegalls i, amb negre, s'ha marcat un hipotètic escenari de risc, tres possibles àrees font i tres possibles línies de drenatge d'esdeveniments potencials. **Font:** (Quan Luna et al., 2014).

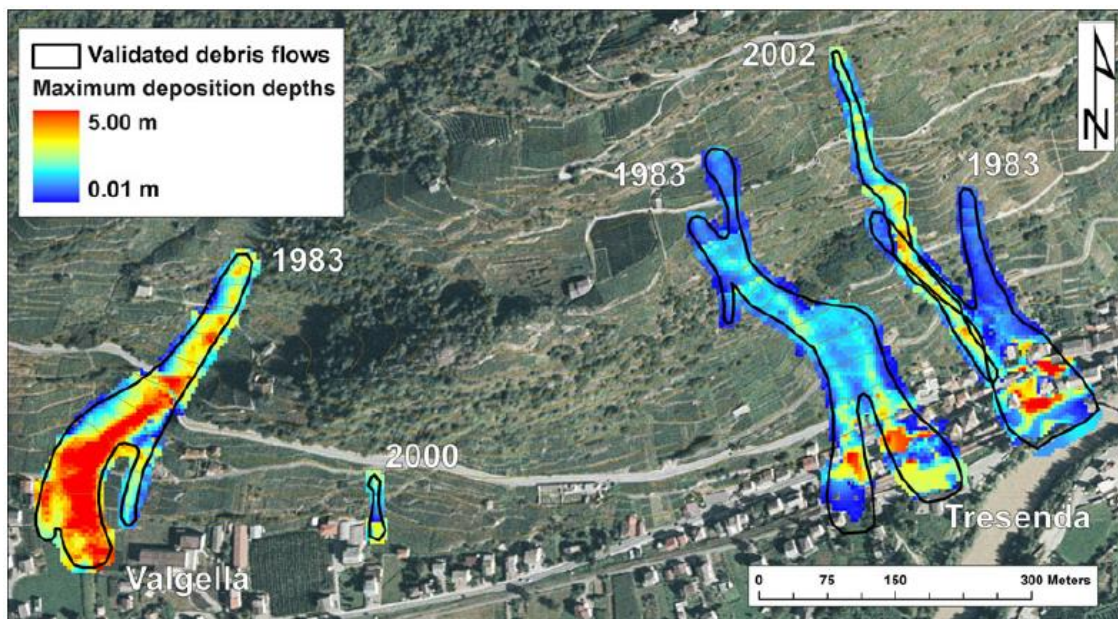


Figura 30. Resultat de la validació del model agafant els esdeveniments dels anys 1983, 200 i 2002 com a referència. Les línies negres marquen l'abast real dels passats corrents d'arrossegalls i les zones de colors són els resultats de la modelització realitzada pels autors. **Font:** (Quan Luna et al., 2014).

Els resultats obtinguts amb la modelització dels tres escenaris analitzats en relació als efectes destructius sobre els elements exposats són els que es mostren en la Taula 27 i la Figura 31.

Al disposar dels valors de vulnerabilitat aplicats pels autors, es pot fer una comparativa entre els resultats donats a la publicació i els resultats obtinguts aplicant els valors de vulnerabilitat proposats en el punt 4.3.2.

Període de retorn	Vulnerabilitat	Nº Edificis damnificats		Costos directes totals per als edificis	Nº Persones damnificades	
10 anys	1	Destructiu	0	5.610.000 €	Destructiu	0
	0.6 – 0.9	Alt	0		Alt	0
	0.2 – 0.5	Moderat	5		Lleus-Moderat	16
	0 – 0.1	Lleu	30		Negligible	96
		Total	35		Total	112
50 anys	1	Destructiu	3	22.410.000 €	Destructiu	10
	0.6 – 0.9	Alt	5		Alt	16
	0.2 – 0.5	Moderat	9		Lleus-Moderat	24
	0 – 0.1	Lleu	32		Negligible	101
		Total	49		Total	151
100 anys	1	Destructiu	4	31.060.000 €	Destructiu	13
	0.6 – 0.9	Alt	4		Alt	14
	0.2 – 0.5	Moderat	22		Lleus-Moderat	68
	0 – 0.1	Lleu	19		Negligible	59
		Total	49		Total	154

Taula 27. Resultats de l'anàlisi quantitativa del risc realitzada pels autors per a cadascun dels tres escenaris de la zona potencial. **Font:** (Quan Luna et al., 2014).

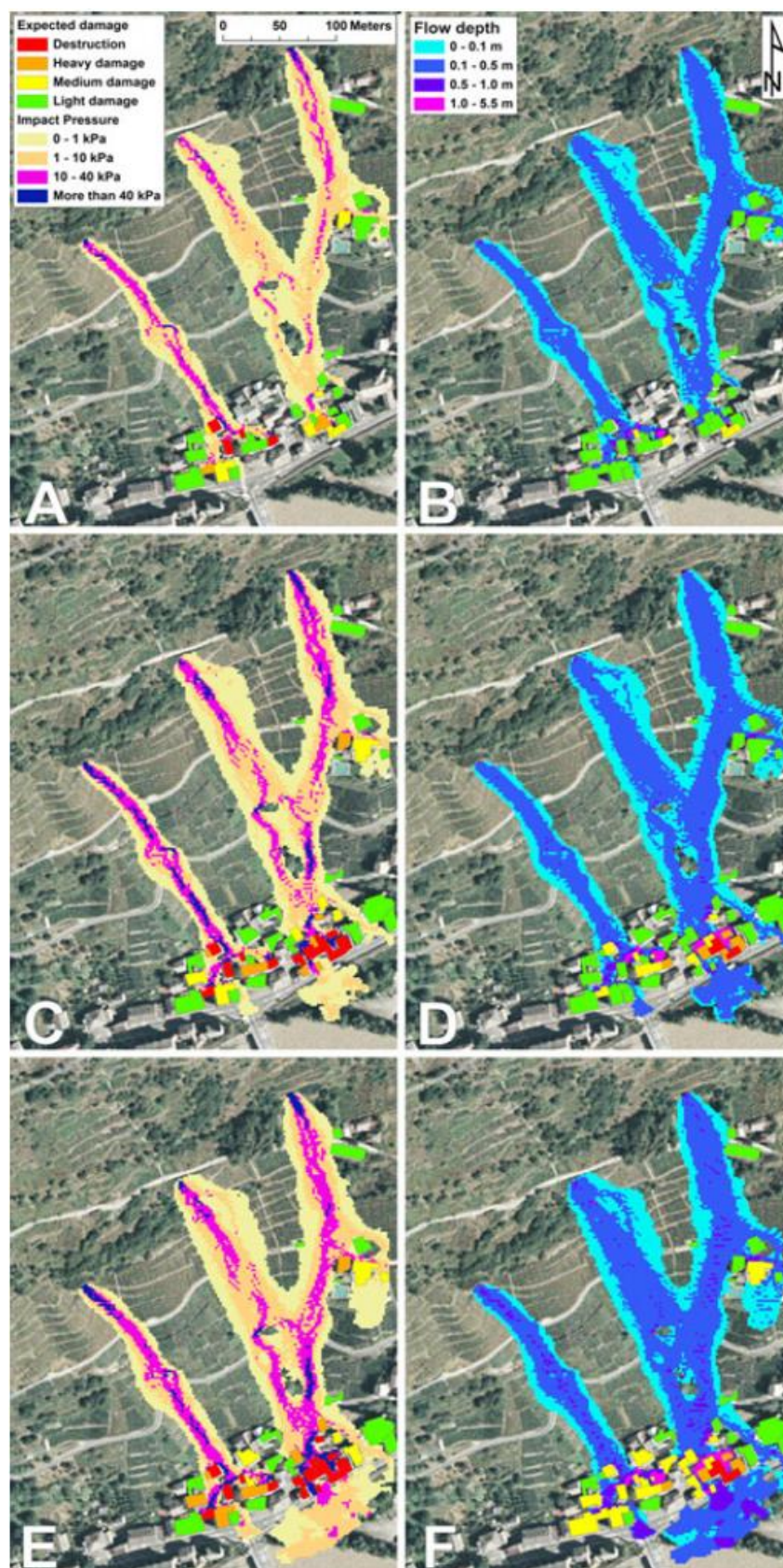


Figura 31. Resultats de la modelització per als tres escenaris determinats. (A) i (B) resultats del primer escenari (període de retorn de 10 anys). (C) i (D) resultats del segon escenari (període de retorn de 50 anys). (E) i (F) Resultats per al tercer escenari (període de retorn de 100 anys).
Font: (Quan Luna et al., 2014).

5.3.3. Metodologia

Per dur a terme l'anàlisi quantitativa del risc, primerament, s'agafaran les dades dels edificis i de les persones damnificades i se'ls hi assignarà el valor de vulnerabilitat segons el que s'ha proposat en el punt 4.3.4. Fet això, ja es pot passar a calcular el risc de corrents d'arrossegalls potencials per a cadascun dels tres escenaris proposats en la publicació. Per a fer aquest càlcul s'aplicarà la fórmula del risc (equació [2]), la qual s'ha citat en el punt 2.3.1. i es mostra una altra vegada continuació:

$$R = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P(L)_j \times P(T|L)_{ij} \times P(I|T)_i \times V_{ij} \times W_i \quad [2]$$

On $P(L)_j$ és la probabilitat d'ocurrència d'una esllavissada amb una magnitud j ; $P(T|L)_{ij}$ és la probabilitat de que una porció de l'esllavissada amb un volum j afecti a un element de risc i ; $P(I|T)_i$ és la probabilitat de que un element de risc donat es trobi situat dins la zona d'abast de l'esllavissada en el moment precís en que es produeixi el fenomen; V_{ij} és la vulnerabilitat que presenta l'element exposat i a rebre l'impacte d'una esllavissada amb un volum j ; i W_i és el valor econòmic de l'element de risc i .

Per al cas del risc de corrents d'arrossegalls per a les persones que es troben dins els edificis s'aplicarà la fórmula del risc modificada per al càlcul de les persones en comptes del d'edificis (Fell et al., 2005):

$$R = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P(L)_j \times P(T|L)_{ij} \times P(I|T)_i \times V_{ij} \times E_i \quad [20]$$

On E_i és el número de persones afectades per l'esdeveniment.

A part, s'aplicarà també la fórmula del risc amb els valors de vulnerabilitat proposats pels autors per tal de poder fer una comparació dels resultats obtinguts amb les dues propostes diferents.

5.3.4. Limitacions

Així com s'han trobat limitacions a l'hora de fer l'anàlisi quantitativa del risc en l'exemple anterior, també se n'han trobat en el present anàlisi. El que passa en aquest cas és el mateix que passava en l'exemple previ: es desconeixen moltes dades referents als elements exposats. Se sap quants d'ells han estat damnificats i amb quin grau, però no se sap quins són sobre el terreny, de manera que no es pot conèixer la seva exposició davant els possibles esdeveniments. Per tant, els resultats que s'obtinguin d'aquest anàlisi també tindran incerteses.

Així doncs, al no disposar de tota la informació necessària, alguns valors de l'equació del risc seran assignats seguint les hipòtesis següents:

- S'aplicarà un valor de $P(T|L)_{ij} = 1$, assumint que els corrents d'arrossegalls arribaran a afectar els edificis considerats.
- S'aplicarà $P(I|T)_i = 1$ assumint que tots els elements exposats considerats es troben dins de la zona d'abast del fenomen.
- S'aplicarà una xifra de 260.000 € com a valor de cadascun dels edificis treballats degut a que es desconeixen els valors econòmics de cadascun d'aquests. S'ha escollit una xifra de 260.000 € perquè segons els autors, és el valor mitjà dels edificis de maçoneria amb estructura de formigó de la població de Tresenda.

Una altra limitació és la de no conèixer la longitud del tram de carretera afectat ja que sense aquesta dada no es pot fer la quantificació del risc per a la infraestructura viària.

5.3.5. Anàlisi quantitativa del risc i resultats

Degut a que en aquest cas no es tenen els valors de les intensitats, és a dir, de les alçades de flux, però sí dels diferents graus de dany produïts pel corrent d'arrossegalls, es començarà assignant els valors de vulnerabilitat per a cadascun dels nivells de dany seguint la proposta feta en el punt 4.3.2. El resultat d'aquest primer pas es mostra a la taula següent:

Danys edificis	V_{ij} (Quan Luna et al., 2014)	V_{ij}	Danys a persones	V_{ij} (Quan Luna et al., 2014)	V_{ij}
Destructius	1	1	Destructius	-	1
Alts	0,9	0,8	Alts	-	0,8
Moderats	0,4	0,35	Lleus-Moderats	-	0,05
Lleus	0,1	0,1	Negligible	-	0,005

Taula 28. Assignació i comparativa dels valors de vulnerabilitat per a cadascun dels graus de dany.

A continuació, es passa a fer l'anàlisi quantitativa del risc de la població. Cada un dels valors dels components de la fórmula del risc s'han assignat de la manera següent:

- S'han aplicat uns valors de $P(L)_j = 0.1$, $P(L)_j = 0.02$ i $P(L)_j = 0.01$ en el primer, segon i tercer escenari, respectivament. Aquests valors són els que han aplicat els autors per al seu anàlisi.
- S'ha aplicat un valor de $P(T|L)_{ij} = 1$ i $P(I|T)_i = 1$ tal i com s'ha definit en el punt 5.2.4 on s'indiquen les limitacions de l'anàlisi.
- S'han aplicat els valors de V_{ij} segons la proposta de valors de vulnerabilitat proposada en aquest treball per a edificis de maçoneria (veure punt 4.3.2).
- Els valors de W_i s'han calculat multiplicant el valor mitjà dels edificis (260.000 €) pel número d'edificis de cadascun dels graus de dany identificats, tal i com es mostra a la Taula 24.

Càlcul de W_i				
Període de Retorn	Grau de dany	Nº Edificis afectats	Valor mitjà dels edificis	W_i
10 anys	Destructiu	0	260.000 €	0 €
	Alt	0		0 €
	Moderat	5		1.300.000 €
	Lleu	30		7.800.000 €
50 anys	Total	35	260.000 €	780.000 €
	Destructiu	3		1.300.000 €
	Alt	5		2.340.000 €
	Moderat	9		8.320.000 €
100 anys	Lleu	32	260.000 €	1.040.000 €
	Total	49		1.040.000 €
	Destructiu	4		5.720.000 €
	Alt	4		4.940.000 €

Taula 29. Taula on es mostra com s'han obtingut els valors econòmics dels elements de risc (W_i) de cadascun dels escenaris.

Els valors aplicats i els resultats obtinguts de l'anàlisi quantitativa del risc per als edificis de la zona potencial de Tresenda són els que es presenten a la Taula 30. Els resultats anàlegs obtinguts a partir de l'aplicació dels valors de vulnerabilitat que assignen els autors es mostren en la Taula 31 i, finalment, la comparativa entre els dos resultats es mostren en la Taula 32.

Anàlisi Quantitativa del Risc per als edificis de maçoneria						
$P(L)_j$	$P(T L)_{ij}$	$P(I T)_i$	W_i	V_{ij}	R	R (anual)
0,1	1	1	0 €	1,00	0 €	0 €
			0 €	0,80	0 €	0 €
			1.300.000 €	0,35	45.500 €	4.550 €
			7.800.000 €	0,10	78.000 €	7.800 €
0,02	1	1	780.000 €	1,00	15.600 €	312 €
			1.300.000 €	0,80	20.800 €	416 €
			2.340.000 €	0,35	16.380 €	328 €
			8.320.000 €	0,10	16.640 €	333 €
0,01	1	1	1.040.000 €	1,00	10.400 €	104 €
			1.040.000 €	0,80	8.320 €	83 €
			5.720.000 €	0,35	20.020 €	200 €
			4.940.000 €	0,10	4.940 €	49 €

Taula 30. Resultat de l'anàlisi quantitativa del risc per al corrent d'arrossegalls de Tresenda (Itàlia).

Anàlisi Quantitativa del Risc per als edificis de maçoneria amb les vulnerabilitats assignades per (Quan Luna et al., 2014)						
$P(L)_j$	$P(L)_j$	$P(L)_j$	W_i	V_{ij}	R	R (anual)
0,1	1	1	0 €	1,00	0 €	0 €
			0 €	0,90	0 €	0 €
			1.300.000 €	0,40	52.000 €	5.200 €
			7.800.000 €	0,10	78.000 €	7.800 €
0,02	1	1	780.000 €	1,00	15.600 €	312 €
			1.300.000 €	0,90	23.400 €	468 €
			2.340.000 €	0,40	18.720 €	374 €
			8.320.000 €	0,10	16.640 €	333 €
0,01	1	1	1.040.000 €	1,00	10.400 €	104 €
			1.040.000 €	0,90	9.360 €	94 €
			5.720.000 €	0,40	22.880 €	229 €
			4.940.000 €	0,10	4.940 €	49 €

Taula 31. Resultat de l'anàlisi quantitativa del risc per al corrent d'arrossegalls de Tresenda (Itàlia) aplicant els valors de vulnerabilitat presentats pels autors en (Quan Luna et al., 2014).

Comparativa dels resultats de les dues anàlisis quantitatives del risc						
Període de Retorn	ΣR	ΣR (Quan Luna et al., 2014)	Diferència	ΣR (anual)	ΣR (anual) (Quan Luna et al., 2014)	Diferència
10 anys	123.500 €	130.000 €	-6.500 €	12.350 €	13.000 €	-650 €
50 anys	69.420 €	74.360 €	-4.940 €	1.388 €	1.487 €	-99 €
100 anys	43.680 €	47.580 €	-3.900 €	437 €	476 €	-39 €

Taula 32. Diferència entre els resultats obtinguts del risc anual aplicant els valors de vulnerabilitat proposats en aquest estudi i els valors de vulnerabilitat presentats per (Quan Luna et al., 2014).

Pel que fa als valors aplicats i als resultats obtinguts de l'anàlisi quantitativa del risc per a les persones que es troben dins dels edificis de la zona potencial de Tresenda, aquests són els que es presenten a la Taula 33. No s'ha fet una comparació amb el risc per a les persones perquè els autors no indiquen els valors de vulnerabilitat d'aquestes.

Anàlisi Quantitativa del Risc per a les persones que es trobin a dins dels edificis						
$P(L)_j$	$P(L)_j$	$P(L)_j$	E_i	V_{ij}	R	R (anual)
0,1	1	1	0	1,00	0	0,00
			0	0,80	0	0,00
			16	0,05	0,08	0,008
			96	0,005	0,048	0,0048
0,02	1	1	10	1,00	0,2	0,004
			16	0,80	0,16	0,0032
			24	0,05	0,01	0,0002
			101	0,005	0,001	0,00002
0,01	1	1	13	1,00	0,13	0,0013
			14	0,80	0,1040	0,001040
			68	0,05	0,0065	0,000065
			59	0,005	0,00065	0,0000065

Taula 33. Resultat de l'anàlisi quantitativa del risc per a les persones situades dins dels edificis de la zona potencial de Tresenda (Itàlia).

5.3.6. Discussió

Comparant els resultats de l'anàlisi quantitativa del risc obtinguts dels càlculs mostrats en el punt anterior i els que donen els autors en la publicació, es pot veure que la diferència entre els valors és molt significativa.

Tal i com s'havia comentat en capítols anteriors, els corrents d'arrossegalls són el tipus de fenomen que més destrucció provoca degut al seu caràcter altament ràpid. Per tant, els valors del risc esperats s'acostarien més als determinats en la publicació de (Quan Luna et al., 2014) abans que als obtinguts aquí.

L'explicació d'aquesta elevada diferència entre els resultats es deu al gran nombre d'incerteses associades a l'anàlisi fet aquí, les quals s'han exposat en el punt de les limitacions. La principal limitació ha sigut no conèixer el valor real exacte de cadascun dels edificis ja que al manca aquesta dada s'ha aplicat el valor mitjà a tots ells, el qual dista molt del valor màxim de 1.1 milions d'euros.

Tanmateix, comparant els resultats de l'anàlisi fet amb els valors de vulnerabilitat proposats en el punt 4.3.2 i els de l'anàlisi fet amb els valors de vulnerabilitat donats pels autors, es pot veure que aquests no mostren una diferència tant notable. Ja era d'esperar al veure que els diferents valors de vulnerabilitat proposats per una part i per l'altra eren bastant similars.

Així doncs, encara que a vegades es realitzin anàlisis amb les poques dades disponibles en comptes de amb totes les dades necessàries, no serveix de gran cosa si les dades no són de qualitat.

6. CONCLUSIONS

En aquest darrer capítol s'exposen les conclusions del present Treball Final de Grau, les quals es basen en les línies principals de les discussions fetes en cadascun dels capítols anteriors.

Després de fer la recerca per redactar el Capítol 2. Síntesi de l'estat de l'art, s'han vist els punts següents:

- La definició del risc.
- Els tipus de moviments del terreny i les seves descripcions, així com la mecànica del moviment, els mecanismes de ruptura i de propagació, o els factors desencadenants, entre d'altres, dels tres tipus d'esllavissaments estudiats aquí: les esllavissades, els desprendiments rocosos i els corrents d'arrossegalls.
- La problemàtica que ha hagut al llarg de la història amb la confusió dels conceptes magnitud i intensitat i les seves definicions acceptades actualment.
- El càlcul del risc d'esllavissada, el qual es fa mitjançant l'equació del risc que es compon de la suma de diferents probabilitats i factors que són, de forma resumida, el perill, l'exposició, la vulnerabilitat i el cost de l'element exposat o el número d'elements exposats si es tracta de persones. A part, aquesta equació del risc permet fer mapes de zonació a partir dels valors resultants.

Per tant, s'ha entès que existeix el risc d'esllavissament del terreny, quins són els fenòmens que el provoquen, com es genera, com es desenvolupa, com interactua i causa danys als elements exposats i, finalment, com es calcula i es representa gràficament sobre mapes.

Feta aquesta immersió en l'àmbit del risc i de la intensitat d'esllavissament del terreny, s'ha fet una proposta de descriptors d'intensitat. Aquesta proposta s'ha realitzat a partir de la recopilació de descriptors proposats en les referències bibliogràfiques consultades i a partir de la pròpia lògica una vegada s'ha entès com actua cadascun dels fenòmens i com interactua amb els objectes exposats. A més, s'ha fet també una proposta d'escala d'intensitat global on s'observen equivalències entre els descriptors i els valors d'intensitat de cada un dels tres tipus d'esllavissada que s'han estudiat en el present treball. Finalment, s'ha aplicat l'anàlisi quantitativa del risc en dos exemples reals per treballar amb alguns dels elements proposats i veure així si a la realitat són aplicables i pràctics o si no ho són.

De tota aquesta feina, doncs, es pot concloure el següent:

1. Efectivament, la intensitat és la que determina el potencial destructiu dels esllavissaments i no la magnitud. El fet més determinant és que, per exemple, un desprendiment d'un bloc de roca de magnitud petita pot arribar a provocar la mort d'una persona i, per altra banda, un vessant d'una vall que s'estigui esllavissant lentament serà un esdeveniment de magnitud gran però que pot ser que no provoqui danys a la gent que s'hi trobi al damunt. A més, la intensitat és un paràmetre que cal donar-li molta importància ja que és amb el que es treballa tant a l'hora de dissenyar les mesures de mitigació dels possibles esdeveniments com a l'hora de gestionar el perill. Per tant, és un factor clau per a la protecció de la població civil.
2. Pel que fa als descriptors d'intensitat recollits en la bibliografia, s'ha vist que els diferents autors acaben coincidint més o menys a l'hora d'escollir els més adequats per a cada tipus de fenomen. A més, la majoria dels autors n'escullen més d'un, recolzant el fet comentat de quants més descriptors menys incerteses.

3. Tot i que la teoria i la proposta feta són lògiques i clares, veient els estudis publicats es pot observar que moltes vegades s'acaba treballant amb els descriptors que hi ha disponibles i fàcilment mesurables en comptes de treballar amb els descriptors més òptims. Això reflexa el fet que en moltes ocasions s'acaba treballant amb el que es pot en comptes de amb el que es vol.
4. S'ha vist que els autors que han treballat amb la vulnerabilitat i amb corbes de vulnerabilitat i fragilitat, ho han fet mitjançant equacions que presenten una linealitat bastant evident. En aquest treball això s'ha discutit i s'ha fet una proposta de rangs de vulnerabilitat els quals resulten mostrar unes tendències més exponencials que lineals.
5. Existeixen moltes publicacions sobre els fenòmens, càlculs del risc, càlculs de la vulnerabilitat, modelitzacions de propagació d'esdeveniments reals, propostes de corbes de vulnerabilitat i fragilitat, investigacions per a dissenys òptims d'elements de mitigació per a aquests fenòmens, etc. Tanmateix, hi ha una mancança d'estudis centrats en la interacció entre els fenòmens aquí estudiats i els elements exposats. Això inclou estudis experimentals on es simulin les condicions dels escenaris que es donen a la realitat per obtenir valors de velocitats, forces d'impacte o desplaçaments diferencials, entre d'altres, els quals es relacionin amb els danys esperables.
6. Una conseqüència del punt anterior és el que ha passat amb la descripció dels danys ja que, per exemple, en el cas dels danys a infraestructures viàries provocats pels desprendiments rocosos, sembla lògic associar els danys al volum de material després, a l'ocupació de la calçada per part del material caigut i a la interrupció del trànsit, abans que considerant solament l'energia cinètica amb la que es desplaça el bloc.
7. Una altra conseqüència del punt 5 és que l'escala d'intensitat proposada és més bàsica de la que s'esperava fer en un principi. El fet de no tenir raonaments suficients per justificar alguns dels valors de l'escala, ha provocat la no inclusió de valors de desplaçament diferencial per a les esllavissades ni de valors de velocitat del flux ni de pressió d'impacte per als corrents d'arrossegalls.
8. Tanmateix, l'escala d'intensitat proposada no pretén ser definitiva ni tancada, sinó que la intenció és posar en comú un munt de dades que fins ara estaven molt dispersades, a més d'obrir camí cap a la creació d'una escala d'intensitat que incorpori el màxim de descriptors possible, per tal de que algun dia es pugui completar suficientment i es pugui arribar a estandarditzar i a aplicar arreu del món tal i com ha passat, per exemple, amb l'escala de Mercalli i l'escala de Richter per als terratrèmols.
9. També és cert que es podria haver fet en aquest treball una proposta més arriscada amb valors completament subjectius sense una explicació associada, però justament per aquesta intenció de que la proposta sigui un primer pas en aquesta línia d'investigació, s'ha preferit no aportar valors inconsistents per no enterbolir la senzillesa i validesa dels valors degudament justificats de l'escala finalment proposada. No obstant, en l'escala presentada hi ha alguns valors amb un alt pes subjectiu però tots ells amb un raonament al darrere i ajustats prou bé als valors i danys que es donen a la realitat.
10. Tenir en compte només l'energia cinètica en l'escala d'intensitat per a desprendiments rocosos limita molt la seva aplicació. Tal i com es pot comprovar en el capítol 5, no hi ha cap exemple fet per a un cas on el fenomen estudiat sigui un desprendiment rocós. Això es deu a que en cap de les publicacions consultades s'ha trobat un estudi de cas real on s'aportessin valors d'energia cinètica. En tots els casos es donaven valors de volum. Per tant, seria interessant continuar treballant l'escala per completar, sobretot, la part referent als desprendiments rocosos.

11. Un fet similar s'ha pogut comprovar en la part referent als corrents d'arrossegalls, de manera que seria convenient continuar investigant per completar l'escala aquí proposada amb valors de velocitats i pressions d'impacte, per exemple, ja que s'ha vist que aquests dos paràmetres s'utilitzen sovint en les modelitzacions de la propagació dels fenòmens d'esdeveniments passats.
12. Pel que fa a estudis on s'exposen anàlisis quantitatives del risc, són molt pocs els que mostren una taula de resultats amb els valors de les mesures fetes al camp dels descriptors o dels obtinguts a través de la modelització. Està molt bé que s'expliqui com es fa una anàlisi quantitativa del risc però seria molt més útil que es mostressin més taules de valors dels descriptors dels esdeveniments i, també, que es referenciessin millor els elements exposats i els corresponents danys ocasionats. De fet, en els dos exemples exposats en el capítol 5, els resultats van acompanyats de moltes incerteses (sobretot en el segon exemple) degut a aquesta mancança d'informació.
13. Comparant, finalment, l'escala d'intensitat per a esllavissades aquí proposada amb les escales d'intensitat per a altres amenaces naturals com terratrèmols, tsunamis o allaus, hi ha una avantatge clara sobre les demés: la proposta feta en aquest estudi es pot integrar d'una manera molt fàcil i pràctica a l'equació del risc ja que permet quantificar la intensitat i també associar a cada nivell d'aquesta un valor de vulnerabilitat.

Finalment, només queda dir que, tal i com es pot comprovar, s'han realitzat tots els punts que s'havien proposat en un inici, tot i que no tots ells s'han obtingut en la mesura esperada. Es pot concloure que s'ha fet una gran feina de recerca, recopilació i aportació de noves idees i punts de vista però que en cap cas s'ha d'acabar aquí, sinó que s'ha de continuar treballant en aquest camp per poder millorar cada vegada més la convivència amb aquests riscos geològics i la seva mitigació.

7. BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA

7.1. Bibliografia

- Abbruzzese, J. M., & Labiouse, V. (2014). New Cadanav methodology for quantitative rock fall hazard assessment and zoning at the local scale. *Landslides*, 11(4), 551–564. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0411-7>
- Abbruzzese, J. M., Sauthier, C., & Labiouse, V. (2009). Considerations on Swiss methodologies for rock fall hazard mapping based on trajectory modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1095–1109. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1095-2009>
- Agliardi, F., Crosta, G. B., & Frattini, P. (2009). Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1059–1073. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1059-2009>
- AGS Sub-Committee. (2000). Landslide Risk Management Concepts and Guidelines. *Australian Geomechanics*, 49–92.
- Akbas, S. O., Blahut, J., & Sterlacchini, S. (2009). Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. In *Proceedings of landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling* (pp. 229–233). Strasbourg.
- Alexander, E. (1993). *Natural disasters*. Springer Science & Business Media.
- Antronico, L., Borrelli, L., Coscarelli, R., & Gullà, G. (2015). Time evolution of landslide damages to buildings: the case study of Lungro (Calabria, southern Italy). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(1), 47–59. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0591-y>
- Avellaneda, R., & Harlem, A. (2011). *Análisis y evaluación de riesgo sísmico en líneas vitales: caso de estudio Bogotá DC/Seismic risk evaluation and analysis on lifelines: case study Bogotá DC*. (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Barbolini, M., Cappabianca, F., & Sailer, R. (2004). Empirical estimate of vulnerability relations for use in snow avalanche risk assessment. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, (77), 533–542.
- Bell, R., & Glade, T. (2004). Quantitative risk analysis for landslides? Examples from Búdudalur, NW-Iceland. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(1), 117–131. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-117-2004>
- Blahut, J., Horton, P., Sterlacchini, S., & Jaboyedoff, M. (2010). Debris flow hazard modelling on medium scale: Valtellina di Tirano, Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(11), 2379–2390. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2379-2010>
- Blahut, J., Klimes, J., & Varilova, S. (2013). Quantitative rockfall hazard and risk analysis in selected municipalities of the Ceske Svycarsko National Park, Northwestern Czechia. *Geografie*, 118(3), 205–220.
- Bunce, C. M., Cruden, D. M., & Morgenstern, N. R. (1997). Assessment of the hazard from rock fall on a highway: Reply. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(3), 344–356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/t97-009>
- Calvo, B., & Savi, F. (2009). A real-world application of Monte Carlo procedure for debris flow risk assessment. *Computers & Geosciences*, 35(5), 967–977. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.04.002>

- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., ... Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(1/2), 57–72. <https://doi.org/10.5194/nhess-2-57-2002>
- Cascini, L.; Cuomo, S.; Pastor, M.; Sorbino, G.; Piciullo, L. (2014). SPH run-out modelling of channelised landslides of the flow type. *Geomorphology*, 214, 502–513. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.031>
- Chen, G., Zheng, L., Zhang, Y., & Wu, J. (2013). Numerical simulation in rockfall analysis: a close comparison of 2-D and 3-D DDA. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(3), 527–541. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0360-9>
- Chen, J. C., & Chuang, M. R. (2014). Discharge of landslide-induced debris flows: case studies of Typhoon Morakot in southern Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7), 1719–1730. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1719-2014>
- Cigna, F., Bianchini, S., & Casagli, N. (2013). How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): The PSI-based matrix approach. *Landslides*, 10(3), 267–283. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0335-7>
- Ciurean, R. L., Hussin, H., van Westen, C. J., Jaboyedoff, M., Nicolet, P., Chen, L., ... Glade, T. (2017). Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. *Natural Hazards*, 85(2), 929–957. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2612-6>
- Corominas, J. (2004). Tipos de rotura en laderas y taludes. *Ingeniería Del Terreno Ingeniería*. Ed: López Jimeno, Carlos. Universidad Politécnica de Madrid, 191–213.
- Corominas, J., Copons, R., Moya, J., Vilaplana, J. M., Altimir, J., & Amigó, J. (2005). Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides*, 2(4), 343–357. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0022-z>
- Corominas, J., & Mavrouli, O. (2011). Quantitative risk assessment for buildings due to rockfalls: some achievements and challenges. In *Journée de Rencontre sur les Dangers Naturels. "2eme Journée de Rencontre sur les Dangers Naturels, 201100*, (pp. 1–8).
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., ... Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3), 209–227. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00065-8)
- Crosta, G. B., Agliardi, F., Frattini, P., & Lari, S. (2015). Key Issues in Rock Fall Modeling, Hazard and Risk Assessment for Rockfall Protection. In *Engineering geology for society and territory* (Vol. 2, pp. 43–58). https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_4
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3- Landslide types and processes. *Transportation Research Board Special Report*, (247), 36–75.
- D'Elia, B., Picarelli, L., Leroueil, S., & Vaunat, J. (1998). Geotechnical characterisation of slope movements in structurally complex clay soils and stiff jointed clays. *Rivista Italiana Di Geotecnica*, 32(3), 5–47.
- Dai, F. ., Lee, C. ., & Ngai, Y. . (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64(1), 65–87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X)

- Dhar, S. A., Dar, T. A., Wani, S. A., Maajid, S., Bhat, J. A., Mir, N. A., ... Hussain, S. (2016). Pattern of rubber bullet injuries in the lower limbs: a report from Kashmir. *Chinese Journal of Traumatology*, 19(3), 129–133. <https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2015.05.005>
- Díaz, J. S. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en zonas tropicales*. Instituto de investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingenierías de Suelos.
- Dorren, L. K. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69–87. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp359ra>
- Dorren, L. K., Berger, F., le Hir, C., Mermin, E., & Tardif, P. (2005). Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. *Forest Ecology and Management*, 215(1), 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.012>
- Dorren, L. K., Maier, B., Putters, U. S., & Seijmonsbergen, A. C. (2004). Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology*, 57(3), 151–167. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00100-4)
- Drummond, C., & Holte, R. C. (2000). Explicitly representing expected cost: An alternative to ROC representation. In *Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining* (pp. 198–207). ACM. <https://doi.org/10.1145/347090.347126>
- Dupire, S., Bourrier, F., Monnet, J. M., Bigot, S., Borgniet, L., Berger, F., & Curt, T. (2016). Novel quantitative indicators to characterize the protective effect of mountain forests against rockfall. *Ecological Indicators*, 67, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.023>
- Elnashai, A. S., & Di Sarno, L. (2008). *Fundamentals of earthquake engineering* (p. 347). New York: Wiley.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27, 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S., & Leroi, E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management. *Landslide Risk Management*, 3–25.
- Ferlisi, S., Cascini, L., Corominas, J., & Matano, F. (2012). Rockfall risk assessment to persons travelling in vehicles along a road: the case study of the Amalfi coastal road (southern Italy). *Natural Hazards*, 62(2), 691–721. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0102-z>
- Ferlisi, S., De Chiara, G., & Cascini, L. (2016). Quantitative risk analysis for hyperconcentrated flows in Nocera Inferiore (southern Italy). *Natural Hazards*, 81(1), 89–115. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1784-9>
- Fotopoulou, S. D., & Pitilakis, K. D. (2013). Vulnerability assessment of reinforced concrete buildings subjected to seismically triggered slow-moving earth slides. *Landslides*, 10(5), 563–582. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0345-5>
- Fuchs, S., Heiss, K., & Hübl, J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(5), 495–506. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-495-2007>
- Galli, M., & Guzzetti, F. (2007). Landslide vulnerability criteria: a case study from Umbria, Central Italy. *Environmental Management*, 40(4), 649–664. <https://doi.org/10.1007/s00267-006-0325-4>

- Guillard-Goncalves, C., Zezere, J. L., Pereira, S., & Garcia, R. A. C. (2016). Assessment of physical vulnerability of buildings and analysis of landslide risk at the municipal scale: application to the Loures municipality, Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 311–331. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-311-2016>
- Gusiakov, V. K. (2011). Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data. *Pure and Applied Geophysics*, 168(11), 2033–2041. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0286-2>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., & Wieczorek, G. F. (2003). Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(6), 491–503.
- Haugen, E. D., & Kaynia, A. M. (2008). Vulnerability of structures impacted by debris flow. *Landslides and Engineered Slopes*. Taylor & Francis, London, 381–387. <https://doi.org/10.1201/9780203885284-c37>
- Henry, J. G., Heinke, G. W., & Escalona, H. J. (1999). *Ingeniería ambiental*. Pearson Educación.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides (p. 129). Reston: US Geological Survey.
- Houze, R. a, Chen, S. S., Smull, B. F., Lee, W.-C., & Bell, M. M. (2007). Hurricane intensity and eyewall replacement. *Science*, 315(5816), 1235–1239. <https://doi.org/10.1126/science.1135650>
- Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 610–623. <https://doi.org/10.1139/t95-063>
- Hungr, O. (1997). Some methods of landslide intensity mapping. *Landslide Risk Assessment*. Balkema, Rotterdam, 215–226.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., & Bateman, A. (2008). Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology*, 102(3), 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.012>
- Hussin, H., Chen, L., Ciurean, R., van Westen, C., Reichenbach, P., & Sterlacchini, S. (2014). Analysing changes in landslide risk using multi temporal landslide susceptibility and run-out modeling on a regional scale. In *Analysis and management of changing risks for natural hazards* (pp. 1–11). Padua, Italy.
- Izatt, C., May, I. M., Lyle, J., Chen, Y., & Algaard, W. (2009). Perforation owing to impacts on reinforced concrete slabs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineering-Structures and Buildings*, 162(1), 37–44. <https://doi.org/10.1680/stbu.2009.162.1.37>
- Jaboyedoff, M., Leibundgut, G., Penna, I., Dahal, R. K., & Sevkota, S. (2015). Characterization of the Jure (Sindhupalchok, Nepal) Landslide by TLS and field investigations. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 17, p. 11858).
- Jakob, M. (2005). A size classification for debris flows. *Engineering Geology*, 79, 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.01.006>
- Jakob, M., Stein, D., & Ulmi, M. (2012). Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Natural Hazards*, 60(2), 241–261. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0007-2>
- Keylock, C. J., & Barbolini, M. (2001). Snow avalanche impact pressure-vulnerability relations for use in risk assessment. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(2), 227–238. <https://doi.org/10.1139/t00-100>

- Khan, A. N. (2013). Analysis of 2010-flood causes, nature and magnitude in the Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Natural Hazards*, 66(2), 887–904. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0528-3>
- Khonsari, R. H., Fleuridas, G., Arzul, L., Lefèvre, F., Vincent, C., & Bertolus, C. (2010). Severe facial rubber bullet injuries: Less lethal but extremely harmful weapons. *Injury*, 41(1), 73–76. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2009.05.018>
- Kusumastuti, D. I., Struthers, I., Sivapalan, M., & Reynolds, D. A. (2006). Threshold effects in catchment storm response and the occurrence and magnitude of flood events: implications for flood frequency. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3, 3239–3277. <https://doi.org/10.5194/hessd-3-3239-2006>
- Lateltin, O., Haemmig, C., Raetzo, H., & Bonnard, C. (2005). Landslide risk management in Switzerland. *Landslides*, 2, 313–320. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0018-8>
- Leone, F., Asté, J.-P., & Leroi, E. (1996). Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. *Landslides-Glissements de Terrain*. Balkema, Rotterdam, 263–270.
- Leroueil, S., Vaunat, J., Picarelli, L., Locat, J., Lee, H., & Faure, R. (1996). Geotechnical characterisation of slope movements. In *7 International Symposium of Landslides* (Vol. 1, pp. 53–74). AA Balkema.
- Levin, B. W., & Nosov, M. A. (2009). *Physics of tsunamis*. Springer.
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., & Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), 125–134. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0190-3>
- Llorens, R. C., & Masquef, A. T. (2009). Movimientos de ladera. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 17(3), 284–294.
- Luna, B. Q., Remaître, A., van Asch, T. W. J., Malet, J. P., & van Westen, C. J. (2012). Analysis of debris flow behavior with a one dimensional run-out model incorporating entrainment. *Engineering Geology*, 128, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.007>
- Macciotta, R., Martin, C. D., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2016). Quantitative risk assessment of slope hazards along a section of railway in the Canadian Cordillera—a methodology considering the uncertainty in the results. *Landslides*, 13(1), 115–127. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0551-4>
- Malet, J. P., & Maquaire, O. (2008). Risk assessment methods of landslides. *Ramsoil, Risk Assessment Methodologies for Soil Threats, Sixth Framework Programme, Project Report*, 2, 1–29.
- Mansour, M. F., Morgenstern, N. R., & Martin, C. D. (2011). Expected damage from displacement of slow-moving slides. *Landslides*, 8(1), 117–131. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0227-7>
- Mavrouli, O., & Corominas, J. (2010). Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings (b). *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(10), 2055–2066. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2055-2010>
- Mavrouli, O., & Corominas, J. (2010). Vulnerability of simple reinforced concrete buildings to damage by rockfalls (a). *Landslides*, 7(2), 169–180. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0200-5>
- Mavrouli, O., Fotopoulou, S., Pitilakis, K., Zuccaro, G., Corominas, J., Santo, A., ... Ulrich, T. (2014). Vulnerability assessment for reinforced concrete buildings exposed to landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 265–289. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0573-0>

- Mavrouli, O., Giannopoulos, P. G., Carbonell, J. M., & Syrmakizis, C. (2016). Damage analysis of masonry structures subjected to rockfalls. *Landslides*, 1–22.
- Merz, B., Thieken, A. H., & Gocht, M. (2007). Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges. In *Flood Risk Management in Europe* (pp. 231–251). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3_13
- Mezughi, T. H., Akhir, J. M., Rafek, A. G., & Abdullah, I. (2011). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model applied to an area along the E-W highway (Gerik-Jeli). *American Journal of Environmental Sciences*, 7(1), 43–50. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2011.43.50>
- Mignelli, C., Lo Russo, S., & Peila, D. (2012). Rockfall risk management assessment: the RO.MA. approach. *Natural Hazards*, 62(3), 1109–1123. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0137-1>
- Molina, S., Giner, J. J., & Jáuregui, P. (2004). El tamaño de los terremotos: intensidad y magnitud. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 12(12.1), 99–107.
- Montero, J. C. (2008). Los conceptos actuales de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, en la prevención de movimientos de lareda, con ejemplos de aplicaciones prácticas.
- Nefeslioglu, H. A., & Gokceoglu, C. (2011). Probabilistic risk assessment in medium scale for rainfall-induced earthflows: Catakli catchment area (Cayeli, Rize, Turkey). *Mathematical Problems in Engineering*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/280431>
- Negulescu, C., & Foerster, E. (2010). Parametric studies and quantitative assessment of the vulnerability of a RC frame building exposed to differential settlements. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(9), 1781–1792. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1781-2010>
- Nicolet, P., Jaboyedoff, M., Cloutier, C., Crosta, G. B., & Lévy, S. (2015). Brief communication: On direct impact probability of landslides on vehicles. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 3, 7311–7332. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-7311-2015>
- Novellino, A., De Agostini, A., Di Martire, D., Ramondini, M., Floris, M., & Calcaterra, D. (2015). Using data from multiple SAR sensors in landslide characterization: case studies from different geomorphological contexts in Italy. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2* (pp. 395–398). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_62
- Novotný, J. (2013). Varnes Landslide Classification (1978). *Addis Ababa University, Ethiopia*.
- Papadopoulos, G. a, & Imamura, F. (2001). A proposal for a new tsunami intensity scale. In *ITS 2001 Proceedings* (pp. 569–577).
- Papathoma-Köhle, M. (2016). Vulnerability curves vs. vulnerability indicators: application of an indicator-based methodology for debris-flow hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(8), 1771–1790. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1771-2016>
- Papathoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M., & Glade, T. (2011). *Physical vulnerability assessment for alpine hazards: State of the art and future needs*. *Natural Hazards* (Vol. 58). <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9632-4>
- Papathoma-Köhle, M., Keiler, M., Totschnig, R., & Glade, T. (2012). Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol. *Natural Hazards*, 64(3), 2083–2105. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0105-9>
- Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H., & Dominey-Howes, D. (2007). Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(6), 765–779. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-765-2007>

- Peila, D., Oggeri, C., & Castiglia, C. (2007). Ground reinforced embankments for rockfall protection: design and evaluation of full scale tests. *Landslides*, 4(3), 255–265. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0081-4>
- Petrucci, O., & Gullà, G. (2009). A Support Analysis Framework for mass movement damage assessment: applications to case studies in Calabria (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 315–326. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-315-2009>
- Petrucci, O., & Gullà, G. (2010). A simplified method for assessing landslide damage indices. *Natural Hazards*, 52(3), 539–560. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9398-8>
- Pitilakis, K. (2008). vulnerability (physical) assessment of buildings and infrastructures. In *Intensive course in quantitative landslide risk assessment and risk management*.
- Prina, E., Bonnard, C., & Vulliet, L. (2004). Vulnerability and risk assessment of a mountain road crossing landslides. *Rivista Italiana Di Geotecnica*, 2, 67–79.
- Quan Luna, B., Blahut, J., Camera, C., van Westen, C., Apuani, T., Jetten, V., & Sterlacchini, S. (2014). Physically based dynamic run-out modelling for quantitative debris flow risk assessment: a case study in Tresenda, northern Italy. *Environmental Earth Sciences*, 72(3), 645–661. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2986-7>
- Quan Luna, B., Blahut, J., Van Westen, C. J., Sterlacchini, S., Van Asch, T. W. J., & Akbas, S. O. (2011). The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(7), 2047–2060. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2047-2011>
- Rapin, F. (2002). A new scale for avalanche intensity. In *International Snow Science Workshop* (pp. 90–96).
- Remondo, J., Gonzalez, A., De Teran, J. R. D., Cendrero, A., Fabbri, A., & Chung, C. J. F. (2003). Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 30(3), 437–449. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007201.80743.fc>
- Richards, B. D. (1944). *Flood estimation and control*. Chapman & Hall Ltd.
- Ronco, C., Oggeri, C., & Peila, D. (2009). Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1189–1199. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1189-2009>
- Sánchez, F. V. (1994). Los terremotos y sus causas. In *El estudio de los terremotos en Almería* (pp. 17–38). Instituto de Estudios Almerienses.
- Scheidl, C., Chiari, M., Kaitna, R., Müllegger, M., Krawtschuk, A., Zimmermann, T., & Proske, D. (2013). Analysing debris-flow impact models, based on a small scale modelling approach. *Surveys in Geophysics*, 34(1), 121–140. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9199-6>
- Sterlacchini, S., Akbas, S. O., Blahut, J., Mavrouli, O., Garcia, C., Quan Luna, B., & Corominas, J. (2014). Methods for the characterization of the vulnerability of elements at risk. In *Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance* (pp. 233–273). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6769-0_8
- Tang, C., Rengers, N., Van Asch, T. W. J., Yang, Y. H., & Wang, G. F. (2011). Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqu city, Gansu Province, northwestern China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(11), 2903–2912. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2903-2011>
- Tang, H., Hu, X., Xu, C., Li, C., Yong, R., & Wang, L. (2014). A novel approach for determining landslide pushing force based on landslide-pile interactions. *Engineering Geology*, 182, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.024>

- Tecca, P. R., Armento, C., & Genevois, R. (2006). Debris flow hazard and mitigation works in Fiames slope (Dolomites, Italy). *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 90, 15–25. <https://doi.org/10.2495/DEB060021>
- Tofani, V., Ventisette, C. Del, Moretti, S., & Casagli, N. (2014). Integration of remote sensing techniques for intensity zonation within a landslide area: A case study in the northern Apennines, Italy. *Remote Sensing*, 6(2), 907–924. <https://doi.org/10.3390/rs6020907>
- Tsao, T. C., Hsu, W. K., Cheng, C. T., Lo, W. C., Chen, C. Y., Chang, Y. L., & Ju, J. P. (2010). A preliminary study of debris flow risk estimation and management in Taiwan. In *International symposium interpraevent in the Pacific Rim—Taipei* (pp. 930–939).
- Uzielli, M., Catani, F., Tofani, V., & Casagli, N. (2015a). Risk analysis for the Ancona landslide-I: characterization of landslide kinematics. *Landslides*, 12(1), 69–82. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0474-0>
- Uzielli, M., Catani, F., Tofani, V., & Casagli, N. (2015b). Risk analysis for the Ancona landslide-II: estimation of risk to buildings. *Landslides*, 12(1), 83–100. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0477-x>
- Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., & Kaynia, A. M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3), 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.011>
- Vada, J. A., Frochoso, M., & Vilaplana, J. M. (2012). Evaluación y cartografía del riesgo de aludes en el camino PR-PNPE 21 de acceso a la Vega de Urriellu, Picos de Europa (Noroeste de España). *Cuaternario Y Geomorfología*, 26(1), 29–47. <https://doi.org/10.17735/cyg.v29i3-4.36540>
- Vallejo, D. (2002). Movimientos de ladera. In *Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada* (pp. 15–27).
- Van Den Eeckhaut, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Rossi, M., & Poesen, J. (2009). Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2), 507–521. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-507-2009>
- van Westen, C. J., van Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation - Why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167–184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
- Wang, B., & Cavers, D. S. (2008). A simplified approach for rockfall ground penetration and impact stress calculations. *Landslides*, 5(3), 305–310. <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0123-6>
- Wang, X., Frattini, P., Crosta, G. B., Zhang, L., Agliardi, F., Lari, S., & Yang, Z. (2014). Uncertainty assessment in quantitative rockfall risk assessment. *Landslides*, 11(4), 711–722. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0447-8>
- Westen, C. Van. (2009). Session 1: Introduction to Disaster Risk Assessment. In *Guide book* (pp. 1–29).
- Whipple, K. X. (1992). Predicting debris-flow runout and deposition on fans : the importance of the flow hydrograph. In *Erosion, Debris-Flows and Environment in Mountain Regions: Proceedings of the Chengdu Symposium, edited by: Walling, D., Davies, T., and Hasholt, B., International Association of Hydrological Sciences* (Vol. 209, pp. 337–345).
- Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C., Oliveira, S. C., & Reis, E. (2008). Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, 94(3), 467–495. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.040>

7.2. Webgrafia

<http://katu.com/news/local/crack-in-road-from-landslide-lane-closed-for-weeks>

www.geology.com

www.wsgs.wyo.gov